

陈拓,赵光思,赵涛.寒区黏土与结构接触面冻结强度特性试验研究[J].地震工程学报,2018,40(3):512-518.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.512

CHEN Tuo, ZHAO Guangsi, ZHAO Tao. Experimental Study on the Freezing Strength Characteristics of Clay-Structure Interface in Cold Regions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 512-518. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.512

寒区黏土与结构接触面冻结强度特性试验研究

陈拓¹, 赵光思¹, 赵涛²

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

摘要: 寒区土与结构接触面冻结强度可以视为是与土性、温度、含水量、界面粗糙度、法向压力等诸多因素直接相关的复杂函数形式,并直接影响到上部结构的承载能力及稳定性。以青藏高原黏土与不同粗糙度的钢板结构接触面为研究对象,通过不同含水率、不同温度及不同法向压力下冻结黏土与钢板结构接触面的直剪正交试验,研究土与结构接触面冻结强度的影响因素及影响程度大小,并对冻结强度的变化规律进行初步分析和探讨。研究结果表明含水量对抗剪强度的影响最大,在不同影响因素共同作用下,界面抗剪强度最小值为 0.13 MPa,最大值为 0.45 MPa。界面抗剪强度随含水量的增加、温度的升高而明显降低,随界面法向压力和粗糙度的增大呈明显增大趋势。界面强度基本可通过摩尔-库仑准则,利用界面的黏聚力和内摩擦角进行表示,并在文中给出了界面强度的参考值。

关键词: 冻土; 接触面; 冻结强度; 正交试验

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)03-0512-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.512

Experimental Study on the Freezing Strength Characteristics of Clay-Structure Interface in Cold Regions

CHEN Tuo¹, ZHAO Guangsi¹, ZHAO Tao²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, Shaanxi, China)

Abstract: Frozen soil is a composite material composed of soil particles, ice, unfrozen water, and gas, and with unstable mechanical properties. The amount of ice determines its temperature sensitivity, and previous research has shown that its negative temperature is the most critical factor that determines its strength; therefore, temperature is a key factor in regulating the bearing capacity of a frozen soil foundation. As the main foundation of major constructions in unstable and ice-rich permafrost regions, a pile foundation is widely used because of its relative stability during permafrost degradation. The freezing strength of a soil-structure interface in the cold regions can

收稿日期: 2017-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(41701058); 中国博士后科学基金(2015M570490)

作者简介: 陈拓(1986-),男,博士,助理研究员,主要从事岩土地震工程与冻土工程等方面的教学和科研。

E-mail: lzchentuo@163.com.

be viewed as a complicated functional form of the soil property, temperature, water content, interface roughness, and normal pressure, which directly influence the bearing capacity and stability of the upper structure. Series of laboratory direct shear tests of the interface between the Qingzang Clay and a steel plate of different roughness were performed. Based on the direct shear tests and an orthogonal design method, the influence factors, influence degree, and mechanical behavior of the shear strength of soil-structure interface were studied. The results show that the amount of water content in the interface has the greatest influence on its shear strength. From laboratory tests, the maximum and minimum interfacial shear strength is 0.45 MPa and 0.13 MPa, respectively, under the different test conditions. Moreover, the shear strength of interface decrease with increasing water content and temperature, and the shear strength increase with increase in the interface roughness and normal pressure. Based on the experimental results, the shear strength of interface can be determined based on Mohr-Coulomb strength criterion; the cohesive strength and internal friction angle are presented in this paper. The results of this study can help prevent and control the disasters of pile foundations at permafrost regions; thus it is of great scientific importance.

Key words: frozen soil; interface; freezing strength; orthogonal test

0 引言

世界上多年冻土主要分布在欧洲、亚洲的北部、北美洲、北冰洋浅大陆架以及中低纬度地区的高山、高原。我国多年冻土分布面积约为世界多年冻土分布面积的10%,占我国国土面积的21.5%,位居世界第三位,其中大部分多年冻土分布在中低纬度、号称世界第三极的青藏高原上^[1]。目前青藏高原已建成青藏公路、青藏铁路、格拉成品油管道、兰西拉光缆通讯、高压输变电工程等5项重大工程。伴随着青藏铁路建成通车,西藏自治区迎来了新一轮经济发展,迫切需要新建高速公路、输变电线路、输油气管道工程等^[2]。

青藏高原多年冻土具有厚度薄、地温高和太阳辐射强等特点^[3]。近数十年来由于全球气候变暖,青藏高原年平均气温普遍上升0.2~0.4℃,气温年较差逐年减小,该区多年冻土多呈区域性退化状态^[4-5]。在冻土退化的大背景下保证基础的稳定性要求冻土与结构物系统必须具备良好的共同工作机制和变形协调条件。因此冻土与结构的相互作用分析,尤其是对冻土-结构接触面特性的认识和研究是至关重要的。

土与结构接触面的力学特性研究是解决土与结构物相互作用问题的前提,土与基础接触面力学特性与土冻结过程中冻胀力、土与基础冻结强度等冻土基础设计关键力学参数密切相关,是冻土力学重要研究课题之一^[6-9]。负温下土中水冻结为冰,同时把土跟基础胶结成一个整体,基础侧表面与地基土

冻结在一起的界面,在受力后所传递的剪切力称为冻结力,界面上所能传递的最大值为冻结强度。多年冻土地区土与结构接触面的冻结力值随着外界荷载及深度等各种因素发生变化,且受温度效应影响显著,可以采用冻土与结构接触界面的剪切强度来度量。确定冻结强度的基本的试验方法为模拟基础材料表面与冻结土体进行剪切试验。Ladanyi等^[10]采用直剪试验研究了冻结砂和铝材料的冻结强度,发现随着温度下降影响冻结强度的控制因素从内摩擦角变为黏聚力;KO Sunggyu等^[11]通过一系列的直剪试验研究了冻结砂、冻结粉土与钢、铝接触面的抗剪强度,以及不同材质对冻土与基础间冻结强度的影响;CHOI Changho等^[12]通过对比分析冻土直剪试验获得的抗剪强度试验结果,提出了通过冻土抗剪强度预测冻结强度的方法。近几年国内的相关研究有:温智等^[13]采用应变直剪仪开展了多种含水率和温度条件下青藏粉土-玻璃钢接触面直剪试验研究;董盛时等^[14]根据冻结粉土与混凝土基础接触面剪切试验建立了冻结粉土接触面应力-位移-温度本构方程。

已有相关研究表明,寒区土与结构接触面冻结强度可以视为是与土性、温度、含水量、界面粗糙度、法向压力等诸多因素直接相关的复杂函数形式。然而在土与结构接触面冻结强度的变化规律、影响因素及程度等方面的研究还不够深入和系统,由此导致对寒区建(构)筑物的沉降变形和稳定性的研究严重滞后于科学和社会需求。本文以青藏高原黏土与

不同形貌尺度的钢板结构接触面为研究对象,通过不同含水率、不同温度及不同法向接触面压力下冻结黏土与钢板结构接触面的直剪正交试验,研究土与结构面冻结强度的影响因素及影响程度大小,并对冻结强度的变化规律进行初步分析和探讨,以期对冻土区基础设计和安全评价提供科学依据。

1 土与结构接触面强度试验概述

1.1 试验土样及制备

试验土样取自青藏铁路沿线北麓河段,相关物理参数列于表1。由于高原地区环境的特殊性和多年冻土的敏感性,原状冻土的取样、运输以及负温保持受取样设备和技术条件限制,本次试验参照《土工试验方法标准(GB/T 50123-1999)》进行重塑黏土的土样制备。

表1 物理参数表

Table 1 Physical parameters

土质	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	含水率 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)
青藏黏土	39.30	20.80	18.50	16.7	1.84

试验前,首先将所采用的钢板结构加工为直径61.8 mm的试块;然后将2个直径为61.8 mm、高20 mm的环刀连接在一起制成40 mm高样品仓;最后将钢板结构试块和按照设定的密度和含水率配制的土样分别放入样品仓中,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,即可制成黏土与钢板结构接触面直剪试验样品。试验过程中目标温度通过与直剪系统连通的冷浴箱进行控制。

1.2 试验仪器及试验条件

低温条件下土与结构接触面强度的变化特性和影响试验采用DRS-1型超高压直残剪试验系统进行^[15]。该试验系统由主机、测量系统、控制系统以及微机数据处理系统4部分组成(图1)。主要技术指标如下:

试样尺寸: $\Phi(51.2 \sim 79.8) \text{ mm} \times 20$ 或 30 mm (试样面积 $20 \sim 50 \text{ cm}^2$);

加载方式:应变控制-剪切速率 $X = 0.001 \sim 1.999 \text{ mm/min}$;应力控制 $-\Delta f = \text{常量}$ (分级加载);

法向压力:最大法向荷载 60 kN ,法向压力范围 $0 \sim 30 \text{ MPa}$;

法向位移: $0 \sim 10 \text{ mm}$;

剪切行程: $0 \sim 20 \text{ mm}$;

剪切方式:单向和往复(加载往复次数 $n = 1 \sim$

9);

控制系统:剪切速率精度 5% ,法向荷载和剪切荷载精度 1% ;

测量系统:荷载测量精度 1% ,位移测量精度 0.5% ;

接口电路:4 Ch.12 Bits A/D, 2 Ch.12 Bits D/A, 16 Bits I/O;

工作环境:温度 $+5 \sim +35 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度小于 85% ;

电源:交流 $(220 \pm 10) \text{ V}$, 10 A 。

该直剪系统的直剪盒经过改造,下剪切盒底部设置了和冷浴箱连通的盘旋铜管,通过低温酒精在铜管内的流通实现对剪切试样目标温度的控制。在实验过程中,将结构面置于下剪切盒,试验土样置于上剪切盒,通过在试样表面中心位置插入温度传感器实时监测试验过程中温度的变化。

利用DRS-1型超高压直残剪试验系统,开展不同法向应力、不同含水量、不同结构面粗糙度条件下,土与结构接触面处于不同冻结温度条件下的剪切力学特性的试验研究。结构面采用形貌因子相同、形貌尺度不同的钢板结构面^[16]。试验条件分别考虑如下:

(1) 试验土样含水率共考虑 10% 、 20% 及 30% 三种情况;

(2) 实验过程中温度分别控制为 $-1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 及 $-5.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 三种工况;

(3) 考虑寒区工程背景,基于建(构)筑物埋藏深度,试验中法向应力分别考虑 100 、 200 及 300 kPa 三种条件;

(4) 采用形貌因子相同、形貌尺度不同的钢板结构面,结构面粗糙程度分别考虑形貌尺度为 0.9 、 0.6 和 0.0 (光滑钢板结构面)三种情况。

通过对不同位置土体的剪切应力-位移曲线变化特性进行分析,获得不同试验条件下土-结构接触面的剪切力学特性影响因素,阐明土与结构接触面的强度及变形随温度的变化规律。

2 正交试验原理及方案

本次试验采用正交试验方法。正交试验法是用来科学地设计多因素试验的一种方法^[17-18]。它利用一套规格化的正交表安排试验,用数理统计方法对得到的试验结果进行处理,使之得出科学结论。正交表是试验设计的基本工具,它是基于均衡分布的

思想,运用组合数学理论构造的一种数学表格,均衡分布性是正交表的核心。任何一张正交表都有如下三个特征:正交性、代表性及综合可比性,因此正交试验虽然安排的是部分试验,却能够了解全面试验的情况,可以代表全面试验。

正交试验法是在试验安排中,每个因素在研究范围内选几个水平,从优选区全面试验点(水平组合)中挑选出有代表性的部分试验点(水平组合)来进行试验。以本试验为例,作为四因素三水平的正交试验,其试验点的选取可以如图 1 所示。图中标有试验号的 9 个“●”就是利用正交表 L₉(3⁴)从 81 个试验点中挑选出来的 9 个试验点。试验点有如下特点:

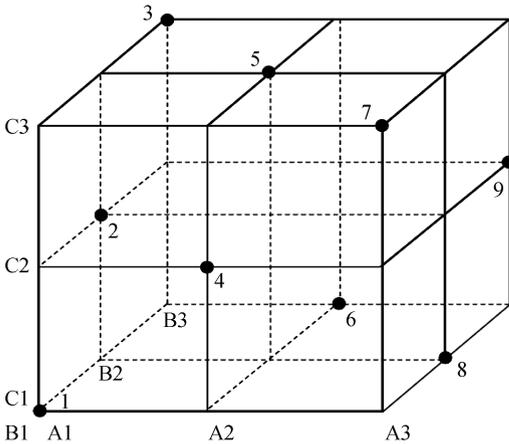


图 1 正交试验点选取示意图

Fig.1 Location of the orthogonal test points

- (1) 数据点分布是均匀的;
- (2) 每一个面都有 3 个点;
- (3) 每一条线都有 1 个点。

本试验设计步骤如下:

- (1) 明确试验目的,确定考核指标。

本文主要通过正交试验探讨土与结构接触面强度的变化特性和不同影响的主次因素,以抗剪强度作为考核指标。

- (2) 挑因素,选水平。

根据以往的经验和相关研究成果,影响土与结构接触界面抗剪强度的主要因素有:土体的含水量、温度、荷载以及结构面粗糙程度 4 个因素。本试验每个因素取 3 个水平(表 2)。

- (3) 选择合适的正交表。

常用的正交表已由数学工作者制定出来,供进行正交设计时选用。本试验选用 L₉(3⁴)正交试验表(表 2)。

- (4) 进行表头设计。

将 4 个因素分别对应 A、B、C、D 列在正交表。

- (5) 确定试验方案。

按因素水平把 A、B、C、D 各列中对应的“1”、“2”、“3”置换成具体水平,共 9 组试验。

- (6) 数据处理

按正交试验极差分析方法对实验数据进行分析。

表 2 四因素三水平正交表

Table 2 Four factors and three levels orthogonal table

试验编号	影响因素			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

按照表 2 所示,按照界面剪切强度试验影响因素,根据因素水平将 A、B、C、D 各列中对应的“1”、“2”、“3”置换成具体水平,设计具体的实验方案(表 3)。根据表 3,可以算出各因素同一水平的指标和与均值 K_m ,并由各水平的均值算出极差 R 。例如 K_{A1} 称为因素 A 相应水平 1 的综合平均值,表示因素 A(含水量)取水平 1(10%)时相应试验结果(抗剪强度)之和的平均值。 R_A 称为因素 A 的极差,取因素 A 各水平综合平均值(K_{A1} 、 K_{A2} 和 K_{A3})中的最大值和最小值之差 [$\text{Max}(K_{A1} \sim K_{A3}) - \text{Min}(K_{A1} \sim K_{A3})$]。

表 3 四因素三水平试验方案

Table 3 Four factors and three levels orthogonal test scheme

试验编号	A 含水量/%	B 温度/℃	C 法向压力/kPa	D 粗糙程度
1	10	-1.0	100	0.0
2	10	-2.0	200	0.6
3	10	-5.0	300	0.9
4	15	-1.0	200	0.9
5	15	-2.0	300	0.0
6	15	-5.0	100	0.6
7	20	-1.0	300	0.6
8	20	-2.0	100	0.9
9	20	-5.0	200	0.0

为了更直观地反映各因素对试验指标(抗剪强度)的影响规律和趋势,分别以因素的水平作为横坐标,综合平均值为纵坐标,得到各因素对试验考核指标的影响趋势图。这里利用了正交表的综合可比性

(或整齐可比性),即任两列间所有可能的组合出现的次数都相等。因此使任一因素各水平的试验条件相同,在每列因素各个水平的效果中最大限度地排除其他因素的干扰,突出本列因素的作用,从而可以综合比较该因素不同水平对试验指标的影响。如在因素 A、B、C、D 中,A 因素的 3 个水平 A1、A2、A3 条件下各有 B、C、D 的 3 个不同水平(表 1~3),即在这 9 个水平组合中,因素 A 各水平下包括了 B、C、D 的 3 个水平,虽然搭配方式不同,但 B、C、D 皆处于同等地位,当比较因素 A 不同水平时,因素 B 不同水平的效应相互抵消,同样的,因素 C 和 D 不同水平的效应也相互抵消,所以因素 A 的 3 个水平间具有可比性。同理,因素 B、C、D 的 3 个水平间也具有可比性。

从趋势图中可以看出,当因素取不同水平时,纵坐标散布范围越大(R 值越大),则该因素就是影响指标的主要因素,反之即为次要因素。根据极差大小可区分因素主次顺序。

3 正交试验结果分析

3.1 剪应力-位移特征分析

图 2 为不同正交试验条件下冻结黏土-结构接触面的切向位移与剪切应力关系曲线。从图中可以看出,不同试验条件下的曲线形态呈现出相似的形态,在试验初始阶段,随剪切位移增大剪切应力急剧增大,直到剪切位移达到 1~2 mm 时出现峰值。剪切位移继续增大时,其与剪切应力的关系曲线渐趋平缓。

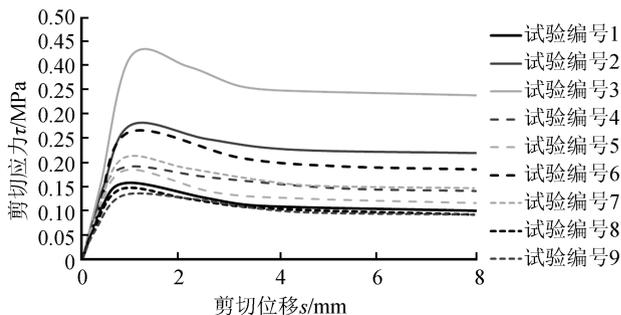


图 2 剪切应力与剪切位移的关系曲线

Fig.2 The relation between shear stress and shear displacement

接触面的剪切应力-剪切位移曲线总体表现为应变软化特性。在法向应力一定的条件下,由于不同编号试验的实验条件不同,低温条件下冻结黏土-结构接触面的力学特性也存在差异。当抗剪强度超

时峰值强度以后,抗剪强度将随剪切位移的增加而逐渐降低,最后达到某一稳定值,这一稳定强度即称残余抗剪强度。峰值剪应力及残余剪应力会随着实验条件的不同而发生明显变化,然而剪切应力-剪切位移的曲线形式并不会发生太大变化。

3.2 冻结强度特性分析

根据不同试验条件下冻结黏土和结构面的剪切应力和剪切位移的关系曲线,将剪应力峰值视为接触面的抗剪强度,根据极差分析,经过统计分析得到不同影响因素下冻结强度正交试验结果(表 4)。

表 4 正交试验结果

Table 4 The results of orthogonal test				
试验编号	含水量/%		法向压力/kPa	
	A	B	C	D
1	10	-1.0	100	0.0
2	10	-2.0	200	0.6
3	10	-5.0	300	0.9
4	15	-1.0	200	0.9
5	15	-2.0	300	0.0
6	15	-5.0	100	0.6
7	20	-1.0	300	0.6
8	20	-2.0	100	0.9
9	20	-5.0	200	0.0
K1	0.896	0.587	0.563	0.483
K2	0.667	0.635	0.634	0.787
K3	0.507	0.848	0.873	0.800
k1	0.299	0.196	0.188	0.161
k2	0.222	0.212	0.211	0.262
k3	0.169	0.283	0.291	0.267
R	0.130	0.087	0.103	0.106
主次顺序	1	4	3	2

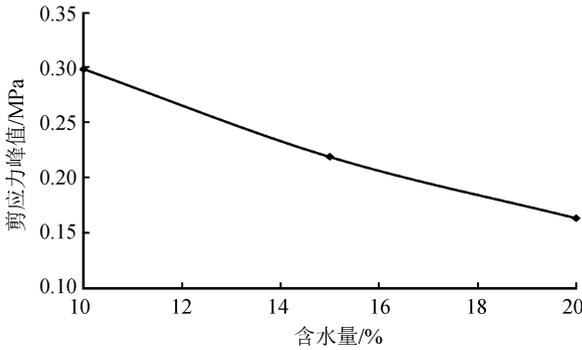
从图 2 可以分析得到,试验 1~9 的抗剪强度随不同因素的变化而呈现出不同的变化规律,不同影响因素共同作用下,界面抗剪强度值最小为 0.13 MPa,最大为 0.45 MPa。通过对实验结果的极差分析,得到不同试验因素对强度参数的影响大小,其顺序为:含水量>粗糙程度>法向压力>温度,即含水量为影响抗剪强度的主要因素,温度对抗剪强度的影响程度最小。同时我们应该认识到,除了通常认识的温度影响,界面抗剪强度同时受含水量、法向压力、界面粗糙度等多种因素的影响作用。界面强度是受多因素综合作用决定的,在工程设计及应用过程中应该考虑多方面的影响。

在试验中温度的控制受外界温度的影响较大,不能精确地保证试验过程中的目标温度,因此导致温度的影响在该试验条件下表现得并不是很明显。同时,温度的影响主要体现在对土体中未冻水含量的影响作用,而未冻水含量主要受土体总含水量决

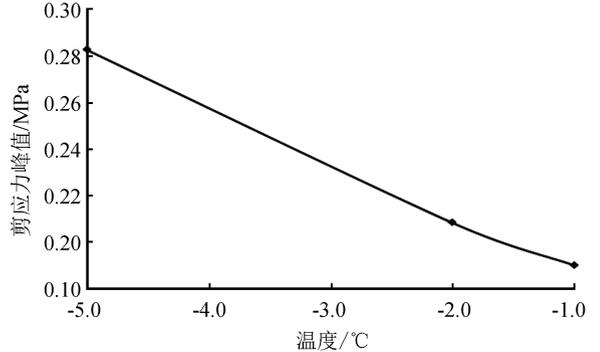
定,因而在该试验条件下含水量的影响远远大于温度的影响。但是从该试验可以看出,界面粗糙度是影响界面抗剪强度和粘结特性的主要因素。

在此基础上,分别对各试验因素影响作用下的

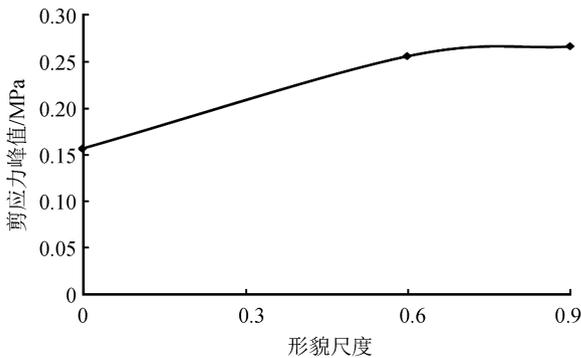
抗剪强度变化规律进行分析,得到界面抗剪强度随各因素的变化曲线(图3)。从图中可以看出,界面抗剪强度随含水量的增加、温度的升高而明显降低,随界面法向压力和粗糙度的增大而明显增大。



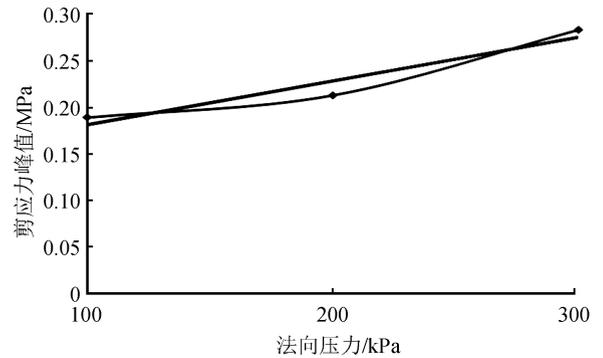
(a) 抗剪强度随含水量变化曲线



(b) 抗剪强度随温度变化曲线



(c) 界面抗剪强度随结构面粗糙度变化曲线



(d) 界面抗剪强度随法向压力变化曲线

图3 各因素对抗剪强度的影响

Fig.3 Influence of different factors on shear strength

通过对强度和法向压力的变化曲线分析,我们可以认为土与结构接触界面强度基本上可以通过摩尔-库仑准则,利用下式表示:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + C \quad (1)$$

其中: C 表示接触界面的黏聚力; φ 表示接触界面内摩擦角。

图3(d)中直线为界面抗剪强度拟合曲线,从图中可以看出在其他试验条件共同影响作用下,界面抗剪强度随法向压力增大而线性增大,其变化规律大致可通过下式表示:

$$y = 0.515x + 127 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.9174$$

对应式(1),可以得到冻结黏土和结构面在多因素综合影响条件下,其黏聚力为127 kPa,等效摩擦角为 27° 。

由于本试验采用的是四因素三水平的正交试验,所以试验得到的强度随各影响因素的变化曲线只能大致反映出界面冻结强度的变化特性,后期应

进行多水平的正交试验,进而建立强度变化模型,探究界面强度变化机理。

4 结论

通过低温条件下冻结黏土-结构面的直剪试验研究,得到对界面抗剪强度影响的不同因素主次顺序,并得到不同因素变化条件下界面抗剪强度的变化特征,主要得到以下结论:

(1) 不同试验条件下的曲线形态呈现出相似的形态,接触面的剪切应力-剪切位移曲线总体表现为应变软化特性。在试验初始阶段,随剪切位移增大剪切应力急剧增大,直到剪切位移达到1~2 mm时出现峰值。剪切位移继续增大时,其与剪切应力的关系曲线渐趋平缓。

(2) 利用正交试验法,得到不同影响因素的主次顺序:含水量>粗糙程度>法向压力>温度,即含水量为影响抗剪强度的主要因素。

(3) 不同影响因素共同作用下,界面抗剪强度

值最小为 0.13 MPa, 最大为 0.45 MPa。界面抗剪强度随含水量的增加、温度的升高而明显降低, 随界面法向压力和粗糙度的增大而明显增大。

(4) 寒区土与结构接触界面强度基本上可以借用摩尔-库仑准则, 利用土与结构接触界面的黏聚力和内摩擦角表示。在其他试验条件共同影响作用下, 界面抗剪强度随法向压力增大而线性增大, 冻结黏土和结构面在多因素综合影响条件下, 其黏聚力为 127 kPa, 等效内摩擦角为 27° 。

参考文献(References)

- [1] JIN H J, ZHAO L, WANG S L, et al. Thermal Regimes and Degradation Modes of Permafrost Along the Qinghai—Tibet Highway[J]. Science in China (Series D), 2006, 49(11): 1170-1183.
- [2] 马巍, 牛富俊, 穆彦虎, 等. 青藏高原重大冻土工程的基础研究[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1185-1191.
MA Wei, NIU Fujiun, MU Yanhu, et al. Basic Research on the Major Permafrost Projects in the Qinghai—Tibet Plateau[J]. Adv Earth Sci, 2012, 11(27): 1185-1191.
- [3] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
ZHOU Youwu, GUO Dongxin, QIU Guoqing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [4] 王昭令. 冻土退化与青藏高原冻土环境问题探讨[C]//第五届全国冰川冻土大会论文集(上). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 11-17.
WANG Zhaoling. Discussion on Frozen Ground Degradation and Frozen Ground Environment in Tibetan Plateau[C]//Proceedings of Fifth National Assembly on Frozen Glaciers. Lanzhou: Gansu Cultural Press, 1996: 11-17.
- [5] 吴志坚, 王平, 霍元坤, 等. 多年冻土区桥梁桩基础地震响应的模型振动试验研究[J]. 西北地震学报, 2009, 31(4): 319-326.
WU Zhijian, WANG Ping, HUO Yuankun, et al. Study on Shaking Table Test for Seismic Response of Pile Foundation of Bridges at the Permafrost Regions[J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(4): 319-326.
- [6] PENNER E, GOLD L W. Transfer of Heaving Forces by Adfreezing to Columns and Foundation Walls in Frost Susceptible Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1971, 8: 514-526.
- [7] SADOVSIKIY A V. Adfreeze between Ground and Foundation Materials[C]//Proceedings of 2th International Permafrost Conference. Yakutsk: [s.n.], 1973: 650-653.
- [8] PERAMESWARAN V R. Creep of Model Piles in Frozen Soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16: 69-77.
- [9] 王兰民, 孙军杰. 特殊土动力学的发展战略与展望[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 88-93.
WANG Lanmin, SUN Junjie. Development Strategy and Prospects for Study of Special Soil Dynamics[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(1): 88-93.
- [10] LADANYI B, THERIAULT A. A Study of Some Factors Affecting the Adfreeze Bond of Piles in Permafrost[C]//Proceedings of Geotechnical Engineering Congress. Canada: [s.n.], 1990: 213-224.
- [11] KO Sunggyu, CHOI Changho. Experimental Study on Adfreeze Bond Strength between Frozen Sand and Aluminium with Varying Freezing Temperature and Vertical Confining Pressure[J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 2011, 27(9): 67-76.
- [12] CHOI Changho, KO Sunggyu. A Study for Predicting Adfreeze Bond Strength from Shear Strength of Frozen Soil[J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 2011, 27(10): 13-23.
- [13] 温智, 俞祁浩, 马巍, 等. 青藏粉土-玻璃钢接触面力学特性直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2013(增刊 2): 45-50.
WEN Zhi, YU Qihao, MA Wei, et al. Direct Shear Tests for Mechanical Characteristics of Interface between Qinghai—Tibetan Silt and Fiberglass Reinforced Plastics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(Supp2): 45-50.
- [14] 董盛时, 董兰凤, 温智, 等. 青藏冻结粉土与混凝土基础接触面本构关系研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1629-1633.
DONG Shengshi, DONG Lanfeng, WEN Zhi, et al. Study of Constitutive Relation of Interface between Frozen Qinghai—Tibet Silt and Concrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1629-1633.
- [15] 周国庆, 赵光思, 别小勇. 超高压直残剪试验系统及其初步应用[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(2): 118-121.
ZHOU Guoqing, ZHAO Guangsi, BIE Xiaoyong. Super-high Pressure Direct/Residual Shear Testing System and Its Primary Applications[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(2): 118-121.
- [16] 周国庆, 夏红春, 赵光思. 深部土-结构接触面与界面层力学特性的直接剪切试验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1157-1162.
ZHOU Guoqing, XIA Hongchun, ZHAO Guangsi. Direct Shear Experiment of Deep Soil-Structure Interface and Interface Layer Mechanical Characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1157-1162.
- [17] 吴顺川, 高永涛, 杨占峰. 基于正交试验的露天矿高陡边坡落石随机预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊): 2826-2832.
WU Shunchuan, GAO Yongtao, YANG Zhanfeng. Random Prediction of Rockfall of Open-pit Mine High-steep Slope Based on Orthogonal Experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp): 2826-2832.
- [17] 陈希孺. 数理统计引论[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
CHEN Xiru. An Introduction to Mathematical Statistics[M]. Beijing: Science Press, 1981.