

冻黏土与结构接触界面层单剪力学特性试验

孙厚超^{1,2}, 杨平^{1*}, 王国良¹

(1. 南京林业大学土木工程学院, 南京 210037; 2. 盐城工学院土木工程学院, 盐城 224051)

摘要: 为了解在荷载作用下, 接触界面层发生的力学响应区别于冻土和结构材料本身力学特性, 使用新研制的冻土与结构接触界面层力学试验仪, 比较系统地研究人工冻黏土与粗糙钢板接触界面层单调剪切力学特性。分别从宏观和细观2个角度出发, 分析冻土界面层的基本力学特性和受力变形机理。结果表明: 随着法向荷载增大, 接触界面的峰值剪应力、稳定剪应力、初始剪切刚度也增大, 接触界面的抗剪强度与法向应力呈线性关系, 可用摩尔-库仑准则来描述; 冻土颗粒的剪切位移随冻土深度增大而减小, 同一冻土深度内, 剪切位移随法向应力的增大而增大, 不同粗糙度的结构接触界面层变形特性基本相似, 试验条件范围内接触界面层厚度为0.5~3.5 mm; 界面层变形可分为冻土与结构接触界面上滑移变形和受结构约束的冻土剪切变形两部分; 结构面粗糙度、冻土温度和法向应力等因素对接触界面层的力学特性具有显著影响。

关键词: 力学特性; 冻土; 剪应力; 接触界面层; 单调剪切; 峰值剪应力

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.010

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0057-06

孙厚超, 杨平, 王国良. 冻黏土与结构接触界面层单剪力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 57-62.

Sun Houchao, Yang Ping, Wang Guoliang. Monotonic shear mechanical characteristics and affecting factors of interface layers between frozen soil and structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 57-62. (in Chinese with English abstract)

0 引言

近年来, 土体与结构物相互作用研究成为岩土界的核心课题之一, 特别是其中土与结构接触面界面层的力学特性已成为研究热点, 由于涉及到大变形、非线性、局部不连续等力学问题而受到重视^[1]。国内外许多学者已经通过物理力学试验手段来研究接触面力学特性, 探究其基本规律和影响因素。如 Clough 和 Duncan 开展接触面直剪试验, 并依据试验结果建立接触面剪应力与相对切向位移双曲线本构模型^[2]; 殷宗泽和 Brandt 等通过大尺寸接触面直剪模型试验, 提出接触面刚塑性破坏模式^[3-4]; Desai 等进行了大量的接触面直剪试验, 研究了砂土与结构接触面的主要影响因素^[5]; 胡黎明等进行了大量的砂土与结构接触面直剪试验, 研究结果得出临界粗糙度接触面的存在, 并将接触面划分为粗糙和光滑两类接触面^[6]; 张嘎等^[7]研制出先进的大型循环直剪仪, 该设备能够精确施加4种法向边界, 并具有通过视窗观测接触面形态的功能。张建民等^[8]研制了大型三维接触面试验仪, 该仪器能实现接触面上任意设定的加载路径, 如

单向往返、十字、圆形、椭圆等。周国庆等^[9]研制了深部土与结构接触面及界面层力学特性试验系统, 利用“旋转结构面法”模拟不同粗糙度的结构面, 并采用“结构面下移法”研究界面层力学特性。Uesugi, Fakharian, Yoshimi 等利用单剪仪、接触面三维试验(C3DSSI)、扭剪仪对接触面力学特性及其影响因素进行试验研究^[10-12]。在课题组赵联桢、杨平等^[13-14]已研制一台大型冻土直剪仪(DDJ-1)的基础上, 作者改制冻土剪切盒, 凸出冻土试样界面层, 增设照相设备, 研发微变形测量系统, 组成冻土与结构接触界面层力学试验系统^[15]。

已有接触面力学特性试验研究主要针对常温黏性土或砂土开展的, 笔者使用新研制的冻土与结构接触界面层力学试验仪, 比较系统的对人工冻黏土与结构接触界面层单调剪切力学特性进行试验研究, 本文对单调力学特性的试验结果进行分析, 并探讨该类接触界面层的基本规律和主要影响因素。

1 接触界面层试验

冻黏土与结构接触界面层力学特性试验采用笔者课题组研制的冻土与结构接触界面层力学试验仪(见图1a), 该设备利用已有大型冻土直剪仪 DDJ-1 的加荷、温控和数据采集系统, 改制冻土剪切盒, 凸出冻土界面层(如图1b所示), 并配备了自主研发微变形测量系统。该系统测量结果精确, 整体误差在1 μm左右。

该设备可提供长20 cm、宽10 cm的接触界面, 可施加接触面最大100 kN切向荷载与最大20 kN法向荷载, 测量最大位移切向2 cm、法向1 cm, 能够开展多种法向

收稿日期: 2014-12-07 修订日期: 2015-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278251); 江苏省高校优秀学科建设项目; 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_0540)

作者简介: 孙厚超, 男, 汉族, 江苏盐城人, 高级工程师, 博士生, 主要从事岩土与地下工程的教学与研究。南京 南京林业大学土木工程学院, 210037。Email: sunhouchao1975@163.com

*通信作者: 杨平, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程的教学与研究。南京 南京林业大学土木工程学院, 210037。

Email: yangping@njfu.edu.cn

边界条件下的单调和往返加载试验, 并且实现自动加载与测量, 不仅能提供接触界面力学试验, 而且提供了数字照相和图像处理微变形测量手段以观测界面层冻土变形。因此, 该试验设备适合研究冻土体与结构接触界面层的力学和变形特性。

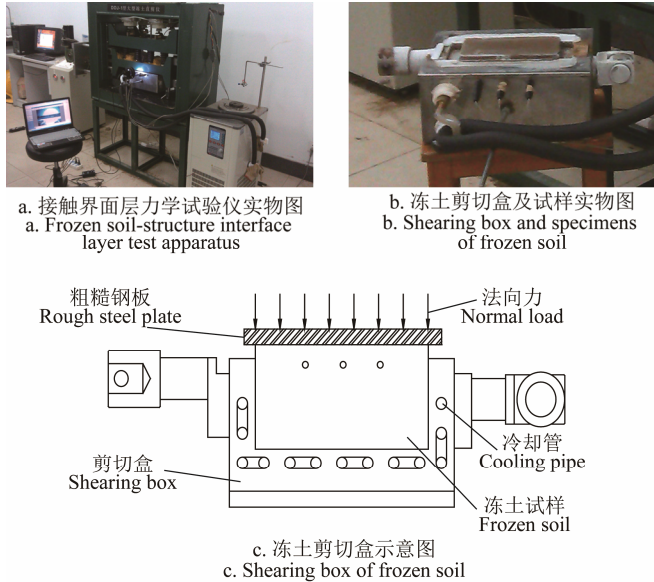


图1 界面层力学试验仪、冻土剪切盒及示意图

Fig.1 Frozen soil-structure interface layer test apparatus, shearing box and specimens of frozen soil

该设备可提供长 20 cm、宽 10 cm 的接触界面, 可施加接触面最大 100 kN 切向荷载与最大 20 kN 法向荷载, 测量最大位移切向 2 cm、法向 1 cm, 能够开展多种法向边界条件下的单调和往返加载试验, 并且实现自动加载与测量, 不仅能提供接触界面力学试验, 而且提供了数字照相和图像处理微变形测量手段以观测界面层冻土变形。因此, 该试验设备适合研究冻土体与结构接触界面层的力学和变形特性。

试验土料采用南京地铁穿越的典型土层——粉质黏土的重塑土, 其物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 试验用冻黏土的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of frozen soil for tests

含水率 Rate of water content/%	土重度 Unit weight/(kN·m ⁻³)	内摩擦角 Internal friction angle/(°)		
		-6℃	-10℃	-14℃
30	18.4	34.44	41.04	45.31

为了研究结构面粗糙度对界面层力学特性的影响, 本文采用一面均匀排列正四棱台形状粗糙钢板来模拟结构面板。粗糙面峰谷距定义为钢板粗糙度 R , 分别为 0.3、0.8、1.4 mm, 如图 2 所示^[13]。下文试验结果均以上述冻黏土和结构面板形成的接触界面层进行的。

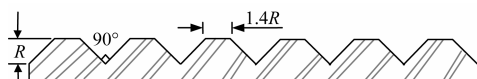


图2 粗糙钢板示意图

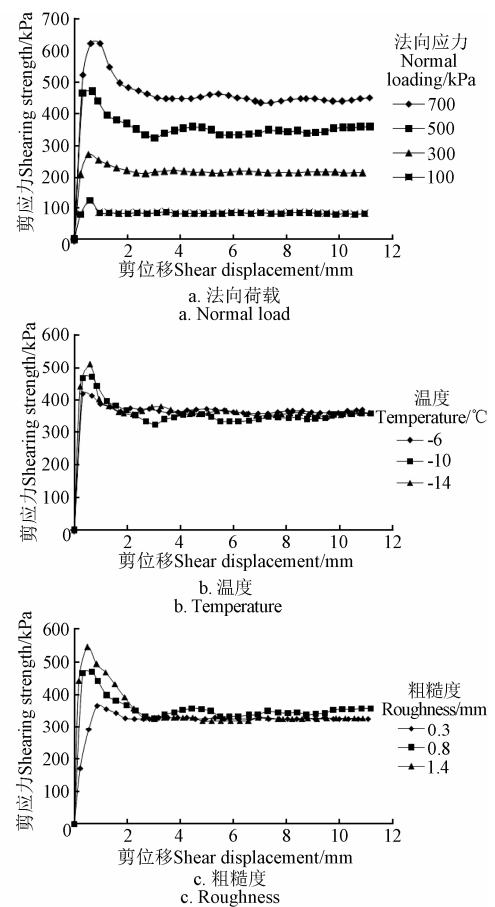
Fig.2 Rough steel plate and definition of roughness

接触界面层由 1 种粉质黏土和 3 种人工粗糙钢板 ($R=0.3、0.8、1.4$ mm) 构成的, 在法向应力为 100、300、500、700 kPa 条件下进行单调剪切试验, 其中冻黏土温度分别为 -6、-10、-14℃。采用位移控制加载方式, 剪切速率为 5 mm/min, 在进行宏观应力、相对位移测量的同时还记录了结构接触界面层内冻土体剪切位移状态, 并对界面层内冻土体细观变形分析。

2 试验结果与分析

2.1 接触界面力学特性

图 3a 给出 -10℃ 粉质黏土与 0.8 mm 粗糙度结构接触界面, 在单调剪切时不同法向荷载作用下剪应力 τ 与相对剪位移 μ 的关系曲线。



注: 图 a: -10℃ 粉质黏土, 粗糙度 0.8 mm; 图 b: 500kPa 法向应力, 粗糙度 0.8 mm; 图 c: -10℃ 粉质黏土, 500 kPa 法向应力。

Note: Fig.a: Silty clay, temperature is -10℃, roughness is 0.8 mm; Fig.b: Normal load is 500 kPa, roughness is 0.8 mm; Fig.c: Silty clay, temperature is -10℃, normal load is 500 kPa.

图3 不同法向应力、温度、粗糙度条件下接触界面 τ - μ 关系图

Fig.3 Shearing strength-shear displacement curve of contact interface under different normal loading, temperature, roughness condition

试验结果表明: 随着相对剪切位移增大, 接触界面的剪应力值开始出现峰值 (称为峰值剪应力), 而后趋于稳定 (称为稳定剪应力), 直至剪切结束。随着法向应力的增大, 接触界面峰值剪应力、稳定剪应力和初始剪切劲度 (即为接触界面剪应力相对剪切位移关系曲线

初始段的斜率)都随之增大。

究其原因为: 开始剪切时, 接触界面剪切力不仅需要克服冻土与钢板之间冻结力, 而且需要克服接触界面摩擦力; 随着剪位移增大, 峰值剪应力迅速衰减, 即冻结力消失, 剪切应力主要是克服钢板与冻土接触界面的摩擦力。接触界面峰值剪应力和稳定剪应力随法向荷载增加而增大, 说明冻土与结构接触界面的抗剪强度在增强。

3 种温度冻黏土与 0.8 mm 粗糙度的结构接触面, 在法向荷载 500 kPa 条件下单调剪切试验, 其剪应力 τ 与相对剪切位移 μ 的关系曲线如图 3b 所示。从图中可见, 随着冻黏土温度降低, 冻土与结构接触界面的峰值剪应力在增大; 而处于稳定剪切阶段时, 冻土的温度对接触界面的剪应力影响较小。这主要因为, 在初始剪切时, 不同冻土温度条件下, 低温冻土与钢板结构接触界面的冻结程度大于高温冻土与钢板结构接触界面, 需要克服冻土与钢板间的冻结力大。而在稳定剪切阶段, 剪切力主要克服界面摩擦力, 受温度影响较小, 接触面上法向荷载起决定作用。

法向荷载 500 kPa 条件下, -10°C 冻黏土与 3 种粗糙度接触界面, 单调剪切剪应力 τ 与相对剪切位移 μ 的关系曲线如图 3c 所示。

图中表明: 随着钢板粗糙度的增加, 冻土与结构接触界面的峰值剪应力在增大; 而处于稳定剪切阶段时, 钢板粗糙度对接触界面的剪应力影响较小。究其原因为: 在初始剪切时, 不同粗糙度的结构面与冻黏土接触面积随粗糙度的增加而增大, 需要克服接触表面冻结力也随之增大。在稳定剪切阶段, 粗糙度对接触界面剪应力的影响相对较小, 主要克服接触界面层内冻土体的摩擦力。

在本试验的法向应力范围内, 接触界面抗剪强度取单调峰值剪应力, 接触界面的抗剪强度与法向荷载呈线性关系。因此, 可用摩尔-库仑准则来描述接触界面抗剪强度。冻黏土与结构接触界面试验所得的摩擦角及黏聚力如表 2 所示。

表 2 接触界面的抗剪强度
Table 2 Strength of frozen soil-structure interface

接触面层 Interface layer		摩擦角 Friction angle/($^{\circ}$)	黏聚力 Cohesive strength/kPa
钢板 Roughness/mm	冻土 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$		
0.3	-6	33.56	23.15
	-10	34.91	26.70
	-14	35.40	48.19
0.8	-6	36.07	30.87
	-10	40.31	32.86
	-14	42.01	65.97
1.4	-6	36.73	38.70
	-10	41.78	43.11
	-14	43.94	69.14

从表 2 中可以看出, 随着结构面粗糙度的增大, 同一负温的冻黏土与结构接触界面的摩擦角也随之增大; 同一粗糙度的结构面与不同温度冻黏土的接触界面摩擦角随着冻黏土的温度降低而增大。接触界面的摩擦角接

近冻黏土本身的摩擦角, 这说明冻黏土与结构接触面发生剪切破坏是发生在冻黏土内部。冻黏土与结构接触界面黏聚力(称为冻结强度)随结构粗糙度和冻土温度变化规律同摩擦角类似。

表 3 为不同温度冻黏土与结构粗糙度 0.3 mm 接触界面峰值剪应力与法向应力回归结果。

表 3 接触界面剪应力与法向应力回归结果 ($R=0.3\text{ mm}$)
Table 3 Regression results of relationship between shear strength and normal stress on contact interface ($R=0.3\text{ mm}$)

冻土温度 Temperature of frozen soil/ $^{\circ}\text{C}$	剪应力与法向应力关系 Relationship of shear stress and normal stress	相关系数 Correlation coefficient
-6	$\tau = 0.633\sigma + 23.15$	0.998
-10	$\tau = 0.697\sigma + 26.7$	0.998
-14	$\tau = 0.71\sigma + 48.19$	0.986

不同粗糙度结构与冻黏土温度为 -10°C 接触界面层峰值剪应力与法向应力回归结果, 见表 4。

表 4 接触界面剪应力与法向应力回归结果 ($T=-10^{\circ}\text{C}$)
Table 4 Regression results of relationship between shear strength and normal stress on contact interface ($T=-10^{\circ}\text{C}$)

结构粗糙度 Roughness of structure /mm	剪应力与法向应力关系 Relationship of shear stress and normal stress	相关系数 Correlation coefficient
0.3	$\tau = 0.697\sigma + 26.7$	0.998
0.8	$\tau = 0.8484\sigma + 32.86$	0.996
1.4	$\tau = 0.873\sigma + 43.11$	0.972

由表 3、4 可知, 剪应力与法向应力呈现较好的线性关系, 其相关系数均达 0.97 以上。同样可以看出, 表中剪应力和法向应力关系式具有相同表达形式, 但变化率不同, 由此说明, 在相同法向荷载条件下, 冻土温度或结构粗糙度不同, 冻土与结构剪应力也不一样。因此, 可将冻土与结构接触界面剪应力与法向应力关系统一用式 (1) 表达。

$$\tau = a\sigma + b \quad (1)$$

式中: a , b 取值显然与冻土温度 T 、结构粗糙度 R 有关, 依此分别讨论冻土温度、结构粗糙度对接触界面力学特性影响。

1) 冻黏土温度的影响

取 a 与 T 线性关系和 b 与 T 幂指数关系, 分别对其进行回归, 可得:

$$a = -0.005T + 0.631 \quad (2)$$

$$b = 12.39e^{-0.09T} \quad (3)$$

其相关系数分别为 0.937、0.914。

综合考察式 (1) ~ (3) 可以看出, 式 (1) 中 a 、 b 具有明确的物理意义, a 表示剪应力随法向应力变化率, 其值随 T 值的降低而增加; b 表示当 $\sigma=0$ 时冻土与结构接触界面的剪应力(可定义为接触界面冻结力), 其值在 $-6 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 变化不大, 而 $-10 \sim -14^{\circ}\text{C}$ 呈指数增加。将式 (2) 及 (3) 代入式 (1) 即可得到考虑冻黏土温度及法向应力条件下冻土与结构接触界面剪应力表达式:

$$\tau = (-0.005T + 0.631)\sigma + 12.39e^{-0.09T} \quad (4)$$

研究表明,在同一法向应力条件下,接触界面剪切强度随冻土温度降低而增加,但是冻土温度降至 -10°C 以下时,接触界面冻结力显著增加。主要由于 -10°C 以下冻土内部冻结冰晶含量和强度显著增加所致。

2) 结构粗糙度的影响

取 a 与 R 幂指数关系和 b 与 R 线性关系,分别对其回归,可得:

$$a = 0.847R^{0.152} \quad (5)$$

$$b = 14.99R + 21.73 \quad (6)$$

其相关系数分别为 0.939、0.991。

将式 (5) 及 (6) 代入式 (1) 即得到考虑结构粗糙度及法向应力条件下冻土与结构接触界面剪应力表达式:

$$\tau = 0.847R^{0.152}\sigma + 14.99R + 21.73 \quad (7)$$

分析表明,在同一法向应力条件下,接触界面剪切强度随结构粗糙度增加而增加,但是结构粗糙度大于 0.8 mm 时,接触界面剪切应力增加程度减小。

2.2 接触界面层变形特性

通过对凸出剪切盒的冻土层直接拍摄照片,可记录冻土与结构面剪切时结构面附近冻土变形状态。并采用自主研发的微变形图像测量技术,对发生单调剪切时距结构面不同深度处冻土颗粒平均剪切位移定量分析。

图 4 为 -10°C 冻黏土分别与 0 (光滑钢板结构)、0.3、0.8、1.4 mm 粗糙度的结构接触界面层,在不同法向荷载作用下,距钢板结构面不同深度 h 与冻黏土颗粒剪切位移 U 的关系曲线。试验结果表明:冻土颗粒的剪切位移随冻土深度增大而减小,同一冻土深度内,冻土颗粒的剪切位移随法向应力的增大而增大,不同粗糙度的结构接触界面层变形特性基本相似;在某一深度处冻黏土剪切位移曲线均出现了拐点,对应于 0、0.3、0.8、1.4 mm 的 4 种粗糙度出现拐点的深度分别约为 0.5、2、3、3.5 mm,定义此拐点深度为接触界面层厚度,这比冻结砂土同一条件下出现的深度要大^[16]。

接触界面层厚度 D 与粗糙度 R 关系如图 5a 所示,从图中可以看出,界面层厚度随结构粗糙度增加而增加,但增加速率在变小,界面层厚度趋于定值。笔者认为,存在一个界限粗糙度,当小于界限粗糙度时,接触界面层厚度主要受结构面粗糙度影响,超过这一界限粗糙度值,界面层厚度受其影响微小,而受冻土体本身的抗剪力性质所决定。究其机理:冻土与齿状结构接触表面积随粗糙度增加而增大,发生剪切时,接触界面剪切强度即剪切力也随之增大,受结构约束的界面层厚度将因剪切力的增大而增大;当结构粗糙度增大到某一界限时,接触界面强度大于冻土本身抗剪强度,接触剪切面发生在冻土内部,不受结构粗糙度影响,界面层厚度趋于定值。

在法向荷载 500 kPa 作用下,粗糙度 0.3 mm 的钢板与不同温度冻黏土的接触界面层,距钢板结构面不同深度 h 与冻黏土颗粒剪切位移 U 的关系曲线如图 5b 所示。结果表明,冻黏土温度一定的条件下,冻土颗粒的剪切位移随冻土深度增大而减小;同一冻土深度内,冻土颗粒的剪切位移随冻黏土温度降低而减小。这主要因为冻

黏土温度降低,冻土内未冻水在减少,冻土体的强度在增大,导致界面层内冻土颗粒剪切变形减小。

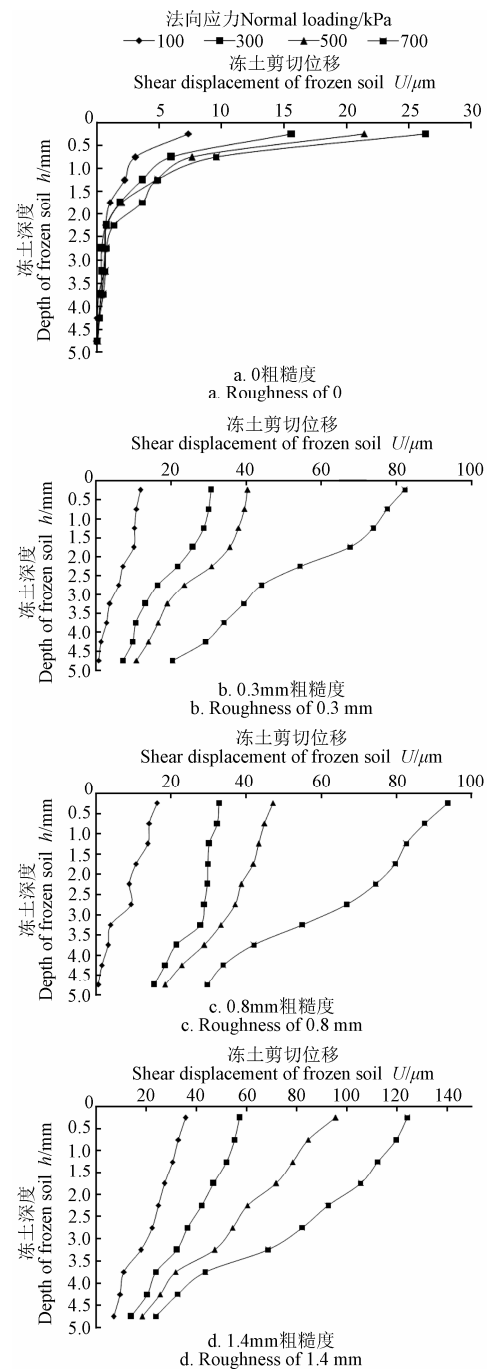


图 4 四种粗糙度在不同法向荷载条件下冻黏土 h - U 关系图 ($T=-10^{\circ}\text{C}$)

Fig.4 Relationships between frozen soil depth h and displacement U under different normal loading by four kinds of roughness

图 5c 为不同粗糙度钢板与 -10°C 冻黏土的结构接触界面层,在法向应力 700 kPa 作用下,距钢板结构面不同深度 h 与冻黏土颗粒剪切位移 U 的关系曲线。从图可以看出,冻土颗粒的剪切位移随接触冻土深度增大而减小;同一冻土深度内,冻土颗粒的剪切位移随钢板粗糙度的增大而增大,钢板粗糙度对剪切位移影响显著。笔者认为随着结构面粗糙度增大,结构面板与冻黏土接触面积越大,从而在接触界面剪切时带动界面层冻黏土的范围越大、深度越深。

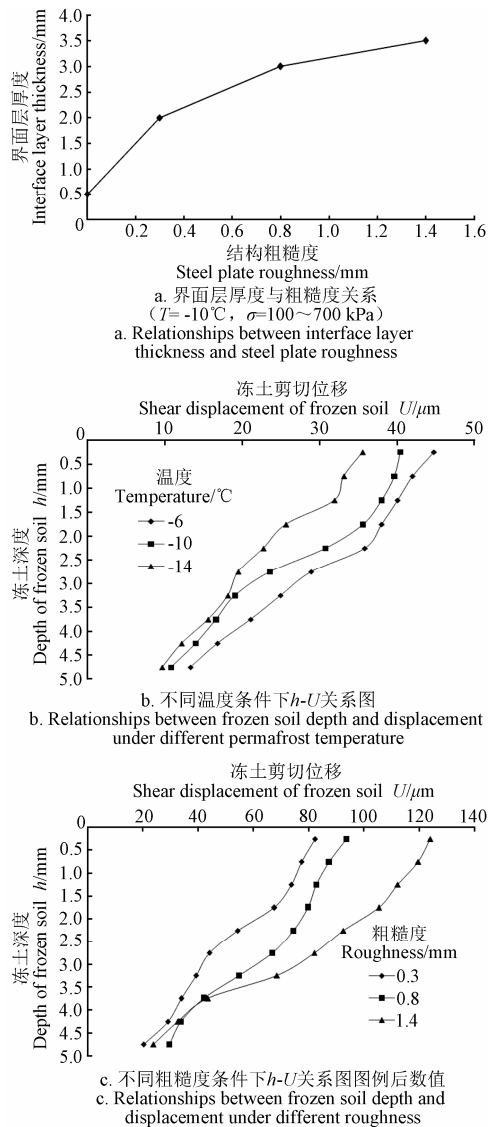


图5 界面层厚度与粗糙度关系以及不同温度、粗糙度条件下 $h-U$ 关系图

Fig.5 Relationships between interface layer thickness and roughness, and relationships between frozen soil depth and displacement under different temperature, roughness

变形分析结果表明: 在冻土与结构剪切过程中, 距离结构面越近的冻土颗粒平均剪切位移越大, 受结构面约束影响, 结构面附近一定范围内的冻黏土颗粒会发生相互错动、断裂。冻土接触界面层在受剪过程中, 不仅接触界面处冻土因结构相对滑移而产生剪切位移外, 还会带动接触界面层内冻土颗粒运动而产生相对剪切位移。由此可知, 对于小粗糙度的结构面, 可能以结构面滑移产生界面冻土相对剪切位移为主; 对于大粗糙度结构面, 可能更突出表现界面层内冻土相对剪切位移。因此, 接触界面层变形可分解为 2 部分组成, 分别为冻黏土与结构接触界面滑移变形和界面层内冻黏土剪切变形 2 部分, 一般总是同时发生、相互影响。

3 结论

基于试验分析了人工冻黏土与结构接触面界面层力学特

性的基本规律、变形机理和主要影响因素, 主要结论如下:

1) 冻黏土与结构接触界面发生剪切时剪应力随剪切位移增加到达峰值剪应力, 而后剪应力迅速衰减并过渡到平稳剪切阶段即稳定剪应力; 随着法向应力增大, 接触界面峰值剪应力、稳定剪应力、初始剪切劲度也增大, 接触界面抗剪强度与法向应力呈较好线性关系, 接触界面抗剪强度可用摩尔-库仑理论描述。

2) 冻土颗粒的剪切位移随接触界面层的深度增大而减小, 同一界面层深度内, 冻土颗粒的剪切位移随法向应力的增大而增大, 不同粗糙度的结构接触界面层变形特性基本相似; 剪切过程中结构面附近的一薄层内冻土平均剪切位移随冻土深度变化出现明显拐点, 表明接触界面层存在厚度, 试验表明该厚度为 0.5~3.5 mm; 接触界面层变形可分解为 2 部分组成, 分别为冻黏土与结构接触界面滑移变形和界面层内冻黏土剪切变形 2 部分, 一般总是同时发生、相互影响。

3) 接触界面剪切强度随冻土温度降低而增加, 但是冻土温度降至 -10°C 以下时, 接触界面冻结力显著增加; 接触界面剪切强度随结构粗糙度增加而增加, 但是结构粗糙度大于 0.8 mm 时, 接触界面剪切应力增加程度减小; 结构面粗糙度、冻黏土剪切力学特性和法向应力等因素对接触面界面层力学特性具有重要影响。

[参 考 文 献]

- [1] 张建民, 张嘎. 土体与结构物动力相互作用研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊 1): 854—865.
Zhang Jianmin, Zhang Ga. Research progress on dynamic interaction between soil and structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Suppl.1): 854—865. (in Chinese with English abstract)
- [2] Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97(SM12): 1657—1672.
- [3] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 14—22.
Yin Zongze, Zhu Hong, Xu Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 14—22. (in Chinese with English abstract)
- [4] Brandt J R T. Behavior of Soil-Concrete Interfaces[D]. Edmonton, Alberta, Canada: University of Alberta, 1985.
- [5] Desai C S, Drumm E C, Zaman M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. J Geotech Engng, 1985, 111(6): 793—815.
- [6] 胡黎明, 濮家骊. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431—435.
Hu Liming, Pu Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431—435. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. 岩石工程学报, 2003, 25(2): 149—153.
Zhang Ga, Zhang Jianmin. Development and application of cyclic shear apparatus for Soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 149—153. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张建民, 侯文峻, 张嘎, 等. 大型三维土与结构接触面试验机的研制与应用[J]. 岩土工程报, 2008, 30(6): 889—894.
Zhang Jianmin, Hou Wenjun, Zhang Ga, et al. Development and application of 3D soil-structure interface test apparatus[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 889—894. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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. (in Chinese with English abstract)
- [10] Uesugi M, Kishida H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4): 139—149.
- [11] Fakharian K, Evgin E. Cyclic simple-shear behavior of sand steel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. J Geotech & Geoenviron Engng, 1997, 123(12): 1096—1105.
- [12] Yoshimi U, Kishida T. A ring torsion apparatus for evaluation friction between soil and metal surface[J]. Geotechnical Testing Journal, 1981, 4(4): 831—834.
- [13] 赵联桢, 杨平, 王海波. 大型多功能冻土与结构接触面循环直剪系统研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 707—713.
Zhao Lianzhen, Yang Ping, Wang Haibo. Development and application of large-scale multi-functional frozen soil-structure interface cycle-shearing system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 707—713. (in Chinese with English abstract)
- [14] Zhao Lianzhen, Yang Ping. Cyclic direct shear behaviors of frozen soil-structure interface under constant normal stiffness condition[J]. Cold Regions Science and Technology 2014, 102: 52—62.
- [15] 孙厚超, 杨平, 王国良. 冻土与结构接触界面层力学试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3636—3642.
Sun Houchao, Yang Ping, Wang Guoliang. Development of mechanical experimental system for interface layer between frozen soil and structure and its application[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3636—3642. (in Chinese with English abstract)
- [16] 赵联桢. 人工冻结砂土与结构接触面力学行为研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
Zhao Lianzhen. The Mechanical Behavior Research on Artificial Frozen Silt-structure Interface[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014. (in Chinese with English abstract)

Monotonic shear mechanical characteristics and affecting factors of interface layers between frozen soil and structure

Sun Houchao^{1,2}, Yang Ping^{1*}, Wang Guoliang¹

(1. Institute of Civil Engineering, Nanning Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: With the increasing of the number of structures in permafrost regions or structures (such as urban underground and mine shaft engineering) using freezing method, the properties of interface layer between frozen soil and structure are receiving more attention. Under the action of loads, the mechanical responses of interface layer are different from frozen soil and structure material. The interface layer between frozen soil and structure is vulnerable to severe damage under the loads of gravity, construction and earthquake, and thus will affect the safety and durability of structures. The newly developed mechanical testing apparatus is used to test the mechanical characteristics of interface layers between frozen soil and structure. Based on the existing apparatus called large-scale frozen soil direct shear system (DDJ-1) in our laboratory, the shearing box of frozen soil is modified to highlight the interface layer of frozen soil, and the measuring system of tiny deformation is developed, which thus constitute the experimental system. Micro deformation measuring system is composed of digital imaging system (DIS) and digital image processing software system (DIPSS). DIS consists of high definition and resolution camera (JHSM1400) and 7.2 mm distortionless industry fixed-focus camera, and DIPSS has functions of calibration setting, measurement setting and data display. The data received from the system are accurate and the error is about only 1 μm . The newly developed mechanical testing apparatus is used to test the mechanical characteristics of interface layers between frozen soil and rough steel plate under the monotonic load. The mechanism of basic forces and deformation of the interface layers is analyzed from the perspectives of macro mechanics and micro deformation. The results show that the peak shearing stress, stable shearing stress and initial shearing stiffness increase with normal stress, and shearing strength of the interface layer is correlated with normal stress. The relationship between this maximum shear stress and normal stress follows the Mohr-Coulomb law. The value of friction angle increases with the roughness of interface at each temperature, and the value of friction angle of interface with the same roughness increases with the decrease of temperature. The value of friction angle of interface is close to that of frozen layer, which demonstrates that the shearing failure occurs in the internal of frozen soil. The shearing displacement of frozen soil particles decreases with the increase of interface layer depth, and increases with the increase of normal stress in the same depth of interface layer; and deformation characteristics of interface layer is similar among the structures with different roughness. The thickness of interface layer is about 0.5-3.5 mm within experimental conditions. The deformation of frozen soil can be decomposed into 2 parts, i.e. slide deformation at the interface and shearing deformation under constraint. The shearing strength of interface layer increases with the decrease of frozen soil temperature and when the temperature is below -10°C , the freezing force is raised significantly. Meanwhile, the shearing strength of interface layer increases with the roughness of structures and when the roughness is above 0.8 mm, the increase rate of shearing stress reduces. The roughness of interface, the temperature of frozen soil and the normal stress have profound effect on mechanic properties of interface layer.

Key words: mechanical properties; frozen soils; shear stress; interface layer; monotonic shear; peak shearing stress