



黑龙江东宁地区季冻土抗压抗剪强度试验研究

刘建宇, 黄伟, 高博, 朱荣利

中国地质调查局 牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江 157021

摘要: 以牡丹江市东宁地区土层(粉土、粉质黏土、黏土)为研究对象,通过工程钻探等技术手段实地采取原状土样,筛选不同含水率、不同土质的样品,经过室内试验设置不同负温条件对原状土单轴抗压强度和三轴剪切强度等物理力学性质进行研究.结果显示,原状土在不同负温条件下冻结后单轴抗压强度随着温度的降低而增大,黏聚力随着含水率的增加呈指数型增大,内摩擦角随含水率的增加先增加后趋于稳定;在试验负温条件下, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为变化界限,小于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冻结土体的单轴抗压强度随含水率的增加呈现先增加后减小的变化规律,黏聚力随着冻结温度降低而增大, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下冻土的内摩擦角有相似的规律,未随含水率增减发生明显变化,此时冻土抗剪强度随着冻结温度的降低而增加;大于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冻结土体的单轴抗压强度随含水率的增加而增加,黏聚力不随冻结温度降低而增加,内摩擦角随着冻结温度的降低而增大,冻土抗剪强度随着冻结温度的降低缓慢增大趋于冰的剪切强度.

关键词: 季冻土;抗压强度;抗剪强度;冻结温度;含水率;黑龙江省

EXPERIMENTAL STUDY ON THE COMPRESSIVE AND SHEAR STRENGTH OF SEASONAL FROZEN SOIL IN DONGNING AREA, HEILONGJIANG PROVINCE

LIU Jian-yu, HUANG Wei, GAO Bo, ZHU Rong-li

Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Mudanjiang 157021, Heilongjiang Province, China

Abstract: Taking the soil layers including silt, silty clay and clay in Dongning area of Mudanjiang City as the research object, collecting and selecting the undisturbed soil samples with different moisture content and soil texture, the paper studies the physical and mechanical properties of soil such as uniaxial compressive strength and triaxial shear strength under different negative temperature conditions. The results show that the uniaxial compressive strength of undisturbed soil increases with the decrease of temperature after freezing under different negative temperature conditions; the cohesion increases exponentially with the increase of moisture content; while the internal friction angle first increases and then tends to be stable with the increase of moisture content. Under the negative temperature conditions, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ is the change point. When the temperature is below $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, the uniaxial compressive strength of frozen soil first increases and then decreases with the increase of moisture content, and the cohesion increases with the decrease of freezing temperature; At $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ or $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, the internal friction angle of frozen soil follows a similar rule, no obvious change with the fluctuation of water content, and the shear strength of frozen soil increases with the decrease of freezing

收稿日期: 2022-05-24; 修回日期: 2022-06-27. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“东北边境珲春-东宁地区综合地质调查”(DD20208014, DZ20220402).

作者简介: 刘建宇(1993—), 男, 从事工程地质水文地质相关工作, 通信地址 黑龙江省牡丹江市东安区卧龙街 45 号, E-mail//79000977@qq.com

通信作者: 黄伟(1986—), 男, 硕士, 工程师, 从事岩石学矿床学等地质相关工作, 通信地址 黑龙江省牡丹江市东安区卧龙街 45 号, E-mail//

langhuan@yeah.net

temperature; When it is above $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, the uniaxial compressive strength of frozen soil increases with the increase of water content, and the cohesion does not increase with the decrease of freezing temperature, while the internal friction angle increases with the decrease of freezing temperature, and the shear strength of frozen soil gradually increases and tends to that of ice with the decrease of freezing temperature.

Key words: seasonal frozen soil; compressive strength; shear strength; freezing temperature; moisture content; Heilongjiang Province

0 引言

许多学者对季冻土的力学性质和影响要素做了研究,但当前对季冻土的力学性质及影响因素研究主要针对人工重塑冻土和冻融阶段,而缺少对于原状土在不同冻结温度和含水率的条件下的强度变化的研究.与重塑人工冻土不同,原状非饱和冻土是复杂的多相体,特殊的水气状态和联通特点,具有显著的结构性,更能体现季冻土真实的力学性质和工作状态.

李海鹏等^[1]研究了饱和粉土在单轴压缩试验下力学性质变化规律,提出土体的应力-应变曲线存在弹性屈服点,指出其与试样的几何形状相关.毛然等^[2]通过直剪试验,研究分析了我国中南地区的冻土在不同负温、含水率下抗剪强度变化规律.赵景峰等^[3]对冻土进行了CBR-1型承载比试验,测定冻土的强度随冻结温度和含水率的变化规律,引入冻结温度和含水率两个参数,建立强度模型.李顺群等^[4]研究了温度、含水率、应变率对冻土力学性质的交互作用.王儒默等^[5]研究了含水率、冻结时间对冻结粉质黏土强度的影响.张宏^[6]进行了直剪、单轴抗压强度测试等试验,研究了高温冻土的直接抗剪强度和单轴抗压强度受温度影响的变化规律.

部分学者采用灰色关联分析和显著性分析对冻土进行了研究.黄道良等^[7]对比了多种影响因素条件下的人工冻土单轴抗压强度试验,发现温度的影响最为敏感.程培峰等^[8]分析了不同含水率、冻融循环次数和压实度条件下的变化规律,发现压实度和含水率的敏感性最大.马玉涛^[9]探究不同负温环境条件下试样的强度、黏聚力、内摩擦角、冻融循环次数和压实度的变化规律.房建宏等^[10]发现冻结红黏土物理力学性质受冻融循环作用次数影响较大.高娟等^[11]进行常规三轴剪切试验,表明含水率对体积变化的影响最大.崔宏环^[12]等选取冻结温度、含水率、围压和融化温度4

种影响正融土强度的因素进行敏感性机理分析,发现冻结温度和含水率最为敏感.

综合上述资料可知,对人工冻土的力学性质和影响要素的显著性分析已经有了一定的研究基础,学者们探究了不同条件下含水率、冻结温度、冻结时间、冻融循环次数、融化温度、土质、压实度、含盐量和围压的变化规律,发现含水率、冻结温度对人工冻土的力学性质影响最为显著,需要重点考虑.结合已有研究与实践,本文针对黑龙江省牡丹江市东宁地区典型季冻土(粉土、粉质黏土和黏土)进行抗压抗剪强度试验,对原状季冻土物理力学特性进行研究,以期为季冻土区的实际工作提供依据.

1 试验准备

土样取自国道331东宁至绥芬河路段(图1).该区域第四系覆盖层分布较为稳定,土质类型在平面上变化较小,分布特征主要受地貌和岩性影响,河谷上广布全-更新统粉土、粉质黏土和黏土,垂直面上变化不大.第四系覆盖层厚度一般为6~18 m,最厚可达30 m.经过实地调研,每年结冻期为10月中下旬至翌年4月上旬,长达6个月之久.最低温度均出现在12月,最低温度可达 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻结深度为0.9~1.1 m^[13].冻结深度内的土层包括粉土、粉质黏土、黏土层.

采用DPP-300型汽车钻机立轴回转钻进,配合 $\phi 110\text{ mm}$ 薄壁取土器于现场采取的原状暖土样,分4个时段分别在国道331沿线4个取样点采取冻土样20件.采取地表0.5~4 m范围内第四系地层,每个位置5件,样品间隔30~50 cm,土样尺寸为110 mm \times 200 mm,土样温度2~15 $^{\circ}\text{C}$,试验室条件下用保鲜膜对土体密封连同模具后冻结至试验设计温度.本次季冻土试验的物理力学测试项目有:含水率、塑限、液限、不同负温条件下单轴抗压试验,三轴剪切试验.

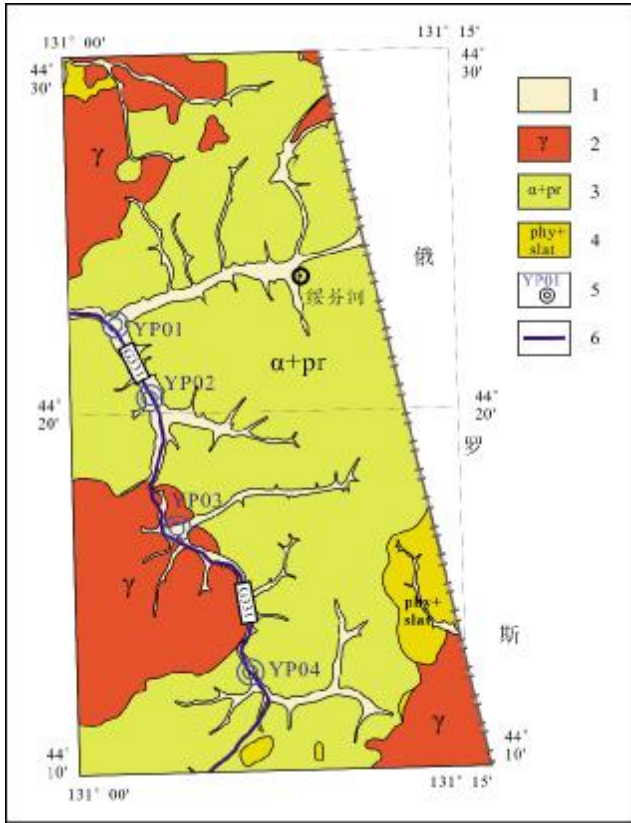


图1 研究区地质简图及取样位置分布

Fig. 1 Geological sketch map of the study area with distribution of sampling locations

1—砂土、黏土(sand and clay); 2—花岗岩(granite); 3—安山岩、火山碎屑岩 (andesite and pyroclastic rock); 4—千枚岩、板岩 (phyllite and slate); 5—采样位置及编号(sampling location and number); 6—国道 (national highway)

2 试验方法与内容

基于季冻土强度的因素主要是外部环境和土体自身两类. 重点选取 3 种主要影响因素进行试验分析, 分别是冻结温度、含水率、土质. 试验过程中需要控制冻结温度和选取 3 种不同土质的土样.

冻土试验按照《人工冻土物理力学性质试验》(MT/T 593.4—2011)进行, 土工试验按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) 进行. 采取的原状土样含水率在 14.8%~32.25%范围内, 按照合适间隔均匀选择20 个不同含水率的土样. 由于土体通常在 0 °C 以下开始冻结, 采样区域季冻土最低气温约为-35 °C, 因此采用-10 °C、-16 °C、-19 °C、-20 °C、-22 °C、-25 °C、-30 °C 六个温度等级, 对同一组试样分 3 种不同温度和含水率对试样先进行冻结, 达到设计负温后, 恒温

不少于 24 h 再进行单轴抗压试验和三轴剪切试验. 三轴剪切强度试验按轴向应变速率 0.5%/min 进行剪切加载, 测定相应土样的基本物理指标(见表 1).

3 试验结果及数据分析

3.1 抗压强度分析

从抗压强度与含水率关系图(图 2)中可以明显看出, 在含水率一定的条件下, 土体抗压强度随着冻结温度的下降而增大. 分析原因是: 在相同含水率的条件下, 随着冻结温度的降低, 土体中部分未冻自由水和弱结合水逐渐冻结成冰, 未冻水比例降低, 水薄膜厚度变薄, 矿物颗粒与冰的胶结作用增强, 土骨架和冻结冰的共同作用增大, 此时由矿物颗粒和冻结冰共同承担施加的抗压强度, 表现为冻土的抗压强度随之增大^[14].

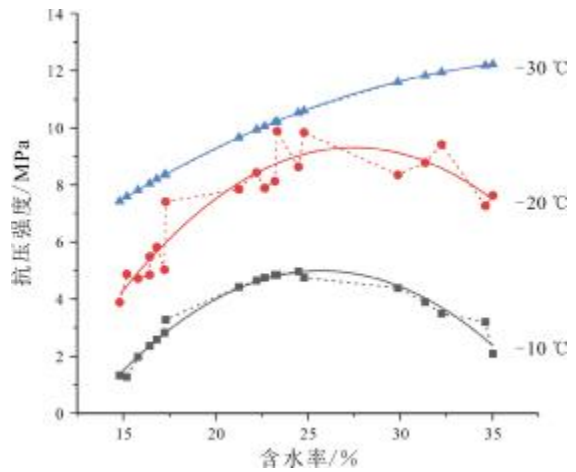


图2 不同负温条件下单轴抗压强度与含水率的关系

Fig. 2 Uniaxial compressive strength vs. moisture content under different negative temperature conditions

对变化曲线进行二阶多项式线性拟合(图 2), 可得不同负温条件冻土抗压强度与含水率的关系: 在-10 °C 不变的条件, 3 种土体的抗压强度随含水率的增加呈现出先增大后降低的变化规律, 置信度水平为 0.95 时, COD 等于 0.97, 单轴抗压强度在含水率为 26% 时达到最大; 在-20 °C 不变的条件, 3 种土体的抗压强度随含水率的增加呈现出先增大后降低的变化规律, 置信度水平为 0.95 时, COD 等于 0.86, 单轴抗压强度在含水率为 26% 时达到最大; 在-30 °C 不变的条件, 3 种土体的抗压强度与含水率有良好的线性关系, 置信度水平为 0.95 时, COD 等于 1, 抗压强度随着含水率的增加趋近于冰的抗压强度.

表 1 土样的基本物理指标
Table 1 Basic physical indexes of soil samples

序号	土质	含水率/ %	抗压强度/MPa			黏聚力/MPa					内摩擦角/(°)				
			-10 °C	-20 °C	-30 °C	-10 °C	-16 °C	-19 °C	-20 °C	-30 °C	-10 °C	-20 °C	-22 °C	-25 °C	-30 °C
1	粉土	14.80	1.33	3.89	7.43	0.17	0.29	0.34	0.38	0.46	28.69	27.80	30.01	35.66	39.03
2	粉土	15.79	1.98	4.72	7.82	0.17	0.35	0.38	0.46	0.44	26.69	27.80	30.72	37.70	40.03
3	粉土	16.42	2.36	5.49	8.05	0.19	0.31	0.37	0.52	0.58	32.02	34.40	31.15	37.96	45.54
4	粉土	17.29	3.28	7.41	8.37	0.26	0.29	0.34	0.61	0.63	34.18	35.60	33.16	38.60	53.26
5	粉土	21.27	4.43	7.85	9.66	0.39	0.35	0.37	1.07	1.12	35.79	35.20	35.75	42.06	50.69
6	粉土	23.22	4.84	8.13	10.20	0.49	0.39	0.44	1.36	1.41	33.89	35.30	35.46	43.1	45.83
7	粉土	31.35	3.90	8.78	11.83	1.07	0.41	0.43	2.97	3.29	31.89	33.20	37.46	44.00	48.81
8	粉质黏土	15.19	1.28	4.87	7.59	0.25	0.39	0.45	0.41	0.45	28.78	27.90	37.95	43.26	42.18
9	粉质黏土	16.42	2.36	4.85	8.05	0.19	0.52	0.88	0.52	0.54	29.79	28.90	37.65	43.56	43.62
10	粉质黏土	16.81	2.58	5.83	8.20	0.28	0.59	1.00	0.56	0.58	32.16	33.50	38.82	46.21	48.24
11	粉质黏土	17.23	2.82	5.03	8.35	0.42	0.64	1.04	0.60	0.62	32.26	33.60	38.12	46.01	49.38
12	粉质黏土	24.48	4.97	8.64	10.53	0.57	0.69	0.98	1.56	1.52	35.23	36.70	38.94	45.12	52.85
13	粉质黏土	29.87	4.39	8.36	11.61	1.24	0.77	1.1	2.62	2.76	34.16	31.40	38.42	46.61	46.22
14	粉质黏土	34.62	3.20	7.27	12.19	1.38	0.76	1.19	3.83	3.48	35.32	37.50	39.58	46.73	54.00
15	粉质黏土	35.03	2.08	7.63	12.23	1.48	0.96	1.22	3.94	3.70	36.96	38.50	39.72	47.21	53.44
16	黏土	22.22	4.66	8.43	9.94	0.41	1.53	2.11	1.21	1.15	32.83	35.40	37.26	44.3	50.98
17	黏土	22.66	4.75	7.89	10.06	0.46	1.91	2.65	1.27	1.32	34.80	34.20	38.44	43.11	49.25
18	黏土	23.33	4.85	9.88	10.23	0.59	2.09	2.79	1.37	1.43	33.89	35.30	40.76	47.9	50.83
19	黏土	24.79	4.75	9.84	10.60	0.58	2.39	3.11	1.61	1.68	34.94	36.40	41.56	48.7	51.42
20	黏土	32.25	3.50	9.42	11.95	1.15	2.61	3.29	3.19	3.32	36.06	38.60	41.92	48.11	55.58

测试单位:黑龙江省水利科学研究院.

分析原因是,冻土由固体矿物颗粒、冻结冰、未冻自由水和气体所共同组成,冻土单轴抗压强度由土体骨架和冰的抗压强度以及冻结冰与矿物颗粒间的黏聚力决定,而重塑人工冻土在重塑后导致结构性的破坏,其破坏强度大都取决于土颗粒之间的连接,导致其脆性比原状土弱^[15].在负温恒定的条件下,随着冻土含水率的增加,冻土抗压强度呈线性增大,当含水率增大到一定值时,固体矿物颗粒与冰的胶结能力达到最大,冻土抗压强度最大^[16].但随着含水率继续增加,水在冻结时体积膨胀,破坏了土骨架的结构,使得固体矿物

颗粒与冰体间胶结能力下降,冻土抗压强度降低.在冻土中含冰量逐渐增加情况下,它的瞬时单轴抗压强度趋近于一个极限,即冰的抗压强度^[17].

3.2 抗剪强度分析

从黏聚力与含水率关系图(图 3a)可以看出不同负温和含水率与冻土黏聚力的关系:在-10 °C、-16 °C、-19 °C、-20 °C、-30 °C的条件下,对变化曲线进行二阶多项式线性拟合,3种冻土的黏聚力随着含水率的增加而增大^[18],置信度水平为 0.95 时, COD 均大于 0.96.分析原因主要是,在 5 种较低负温条件下,冻土中的冰

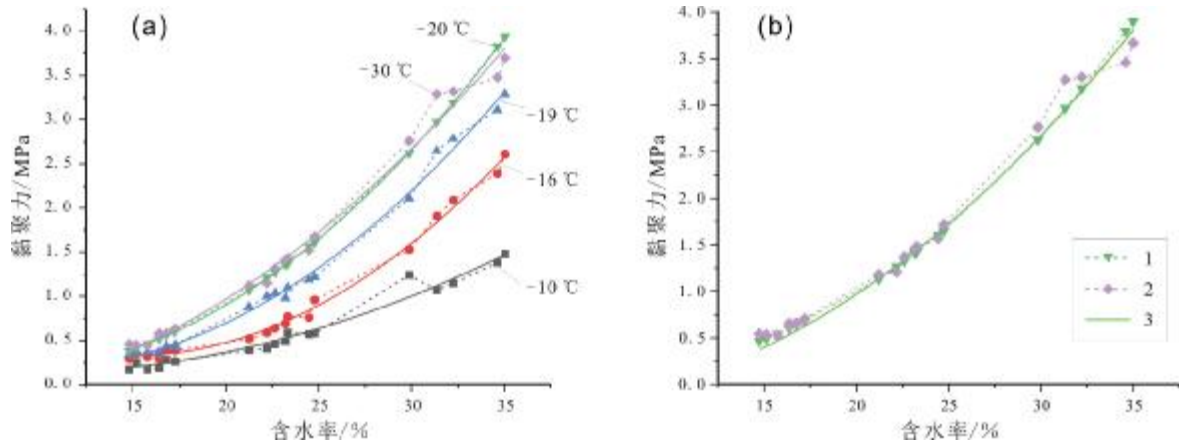


图3 不同负温条件下黏聚力与含水率的关系

Fig. 3 Cohesion vs. moisture content under different negative temperature conditions

1— $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黏聚力(cohesion at the temperature of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2— $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黏聚力(cohesion at the temperature of $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$); 3— $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黏聚力拟合曲线(fitting curves of cohesion at the temperature of -20 and $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

与土体骨架已经形成了较好的黏结,随着含水率的增加,固体颗粒弱结合水膜厚度减小,冻土中的未冻水和土颗粒最外层的弱结合水逐渐转化成冰,冻土中的未冻水含量减小,使土颗粒分散程度变小.在这种情况下,土骨架颗粒与胶结冰共同作用增强,冰和土体中固体颗粒胶结在一起共同承担冻土抗剪强度,已冻冰对冻土的黏聚力影响显著增加,导致冻土的黏聚力随含水率的增加而增大.将 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下含水率与黏聚力的关系数据拟合为一条曲线(图3b),置信度水平为0.95时,COD等于0.99,这两种温度条件下黏聚力随温度降低几乎没有变化,可视 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为变化界限^[19].小于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,黏聚力随着冻结温度降低而增大;大于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,黏聚力不随温度降低而增加.分析原因主要是, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冻土中的固体矿物颗粒与冻结冰胶结程度达到最优,在含水率相同的条件下,此时黏聚力达到最大.

由内摩擦角与含水率关系图(图4)可知: $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下冻土的内摩擦角有相似的规律,未随含水率增减发生明显变化.温度小于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冻土的内摩擦角随着冻结温度的降低而增大^[20],最大为 55° .内摩擦角随含水率增长的变化规律分为两个阶段:1)含水率小于17%时,内摩擦角随含水率的增大而增大.2)含水率大于17%时, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,内摩擦角稳定在 33° ; $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,内摩擦角稳定在 38° ; $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,内摩擦角稳定在 43° ; $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,内

摩擦角稳定在 46° .分析原因是,含水率增加到17%时,土体已达到最佳含冰量,土中大部分水转变成冰,土颗粒与冰之间产生胶结作用增加了冰与土颗粒间的胶结力与咬合力,提高了内摩擦角;当含水率大于17%时,水在冻结时体积膨胀,破坏了土骨架的结构,使得固体矿物颗粒与冰体间胶结能力与咬合能力受到影响,此时内摩擦角无明显线性规律可循,在一定范围内小幅度波动;当温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冻土由半塑性土变为脆性冻土,冻土骨架遭到破坏致使内摩擦角变大^[21].

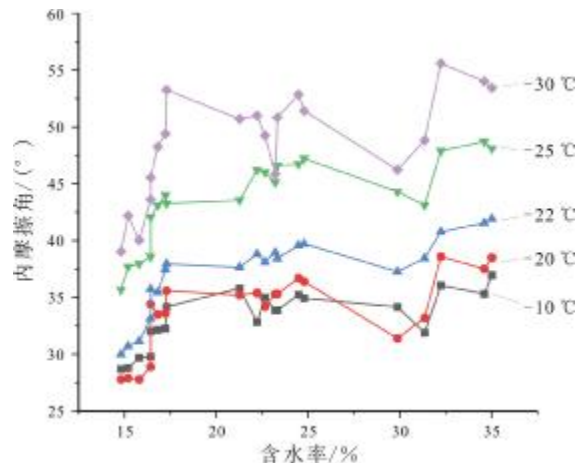


图4 不同负温条件下内摩擦角与含水率的关系

Fig. 4 Internal friction angle vs. moisture content under different negative temperature conditions

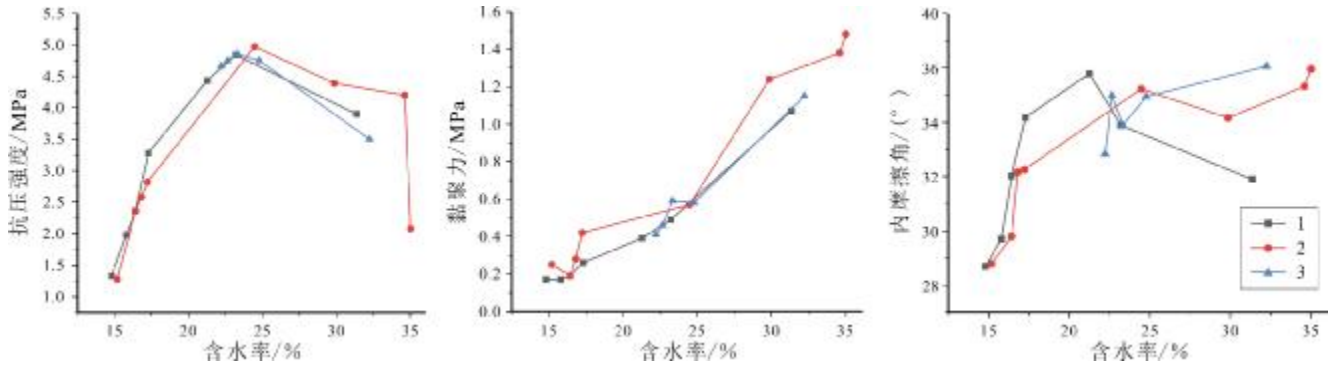


图5 -10 °C条件下抗压、抗剪强度与土质的关系

Fig. 5 Relationship between compressive strength, shear strength and soil texture at temperature of -10 °C

1—粉土(silt); 2—粉质黏土(silty clay); 3—黏土(clay)

3.3 冻结土抗压、抗剪强度与土质关系

图5分别为3种土样在冻结温度为-10 °C条件下抗压强度、黏聚力和内摩擦角与含水率的关系曲线。在相同含水率条件下,粉土、粉质黏土、黏土的抗压强度、黏聚力和内摩擦角变化不大。分析主要原因是,土中土颗粒大小和组成差别小,物理力学性质相近,此时冻结温度和含水率已成为影响抗压、抗剪强度的主要因素,土质的差异性已不明显。

4 讨论

笔者主要研究了东宁地区原状土在不同负温条件下的抗压抗剪强度的变化规律,主要结论与前人的研究结果是一致的,在趋势变化上基本相同,但在变化界限点和极值点上有所差异。主要是因为本研究侧重的是季冻土区内采取的原状土,保持了土的原始结构,减少了人为因素的影响。通过室内试验模拟原状季冻土的真实状态,发现原状冻土对温度和含水率的响应不如人工重塑冻土区明显,存在较大波动和随机误差,主要原因是原状土作为复杂的多相体,具有显著的结构性、不均匀性。鉴于试验条件和时间等方面的限制,研究只考虑了原状土的含水率、冻结温度、土质3种影响因素,缺少对原状土水分迁移和聚集、冻融作用的研究,在后续研究中还需要进一步完善。

5 结论

对取自东宁地区季节性冻土区粉土、粉质黏土和黏土3种典型原状土样在不同负温、不同含水率条件下进行抗压强度和抗剪强度试验。基于试验结果分析

可得出如下结论。

(1)原状土在不同负温条件下冻结后,单轴抗压强度随着温度的降低而增大。-10 °C、-20 °C时,冻结土体的单轴抗压强度随含水率的增加呈现先增加后减小的变化规律;-30 °C时,冻结土体的单轴抗压强度随含水率的增加而增加。

(2)黏聚力随着含水率的增加呈指数型增大,内摩擦角随含水率的增加先增加后趋于稳定。含水率小于17%时,内摩擦角随含水率的增大而增大;含水率大于17%时,内摩擦角无明显线性规律可循,在一定范围内小幅度波动。因此冻土抗剪强度随着含水率的增加而增加。

(3)冻结温度-20 °C为变化界限:小于-20 °C时,黏聚力随着冻结温度降低而增大,-10 °C、-20 °C条件下冻土的内摩擦角有相似的规律,未随含水率增减发生明显变化,此时冻土抗剪强度随着冻结温度的降低而增加;大于-20 °C时,黏聚力未随冻结温度降低而增加,内摩擦角随着冻结温度的降低而增大,冻土抗剪强度随着冻结温度的降低缓慢增大趋于冰的剪切强度。

(4)在试验负温条件下,土体主要受冻结温度和含水率影响。温度-10 °C时,冻土中的冰已经成为抗压、抗剪强度的主要因素,土质的差异性作用已不明显。

参考文献(References):

- [1]李海鹏,杨维好,黄家会,等.试件形状对冻结粉土抗压强度影响的试验研究[J].冰川冻土,2005,27(6):920-925.
Li H P, Yang W H, Huang J H, et al. An experimental study of the

- effect of specimen shape on compressive strength of frozen silt [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(6): 920-925.
- [2]毛然, 王翠英. 中南地区冻土抗剪强度影响因素研究[J]. *安全与环境工程*, 2010, 17(5): 102-105.
Mao R, Wang C Y. Study on the influential factors of frozen soil shear strength of central south region[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2010, 17(5): 102-105.
- [3]赵景峰. 冻土抗拉强度与冻温及含水率关系的试验研究[J]. *地质与勘探*, 2011, 47(6): 1158-1161.
Zhao J F. An experimental study on the relationship between tensile strength and temperature and water ratio of frozen soil[J]. *Geology and exploration*, 2011, 47(6): 1158-1161.
- [4]李顺群, 高凌霞, 柴寿喜. 冻土力学性质影响因素的显著性和交互作用研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(4): 1173-1177.
Li S Q, Gao L X, Chai S X. Significance and interaction of factors on mechanical properties of frozen soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 1173-1177.
- [5]王儒默, 马芹永. 冻结时间对冻土抗压强度影响的试验分析[J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(1): 74-79.
Wang R M, Ma Q Y. Experimental analysis of the influence of freezing time on compressive strength of frozen silty clay[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 39(1): 74-79.
- [6]张宏. 高温冻土力学特性试验研究[J]. *人民黄河*, 2019, 41(8): 144-147.
Zhang H. Experimental research on mechanical characteristics of high-temperature frozen soils[J]. *Yellow River*, 2019, 41(8): 144-147.
- [7]黄道良, 林斌. 人工冻土力学性能影响因素敏感性分析[J]. *力学与实践*, 2012, 34(4): 63-65, 48.
Huang D L, Lin B. Sensitivity analysis on the influence factors of the mechanical properties of the artificial frozen soil [J]. *Mechanics in Engineering*, 2012, 34(4): 63-65, 48.
- [8]程培峰, 陈景龙, 韩春鹏, 等. 季冻区路基土回弹模量影响因素分析[J]. *公路*, 2013(10): 174-178.
Cheng P F, Chen J L, Han C P, et al. Influencing factor analysis of subgrade resilience in the seasonal freezing region[J]. *Highway*, 2013 (10): 174-178.
- [9]马玉涛. 张家口季冻区公路路基填土的静动力学特性研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2017.
Ma Y T. Study on static and dynamic mechanical behavior of highway subgrade soil in Zhangjiakou seasonally-frozen area [D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2017.
- [10]房建宏, 陈鑫, 徐安花, 等. 冻融循环对青藏红黏土物理力学性质影响试验研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 62-69.
Fang J H, Chen X, Xu A H, et al. Experimental study of the influence of freezing-thawing cycles on physical and mechanical properties of Qinghai-Tibet red clay [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 62-69.
- [11]高娟, 廖孟柯, 常丹, 等. 冻结砂土体积变形影响因素的敏感性分析[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 346-354.
Gao J, Liao M K, Chang D, et al. Sensitivity analysis of the factors affecting the volumetric deformation of frozen sandy soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 346-354.
- [12]崔宏环, 王文涛, 杨兴然, 等. 季节冻土区正融粉质黏土强度影响因素敏感性分析[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(3): 899-908.
Cui H H, Wang W T, Yang X R, et al. Sensitivity analysis of the influencing factors on strength of silty clay in seasonally frozen regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(3): 899-908.
- [13]王宁. 黑龙江省季节冻土厚度的时空变化及其对气温、土地利用变化的响应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2018: 9-15.
Wang N. The spatial and temporal variation of seasonal frozen soil thickness in Heilongjiang Province and its response to temperature and land use change [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2018: 9-15.
- [14]程培峰, 王锐, 韩春鹏. 大兴安岭人工冻土抗压抗剪强度试验研究[J]. *中外公路*, 2016, 36(5): 5-8.
Cheng P F, Wang R, Han C P. Experimental study on compressive and shear strength of artificial frozen soil of Daxinganling Mountains [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2016, 36(5): 5-8. (in Chinese)
- [15]陈士威, 林斌. 原状与重塑冻结黏土单轴抗压对比试验[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(6): 62-66.
Chen S W, Lin B. Contrast test on uniaxial compression of undisturbed and remolded frozen clay [J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(6): 62-66.
- [16]王锐. 高纬度多年冻土地区路基工后沉降变化规律研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016: 17.
Wang R. Study on the roadbed settlement change rule after constructed in permafrost regions of the high altitude [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016: 17.
- [17]贾霄. 天津地区人工冻土力学特性试验及其工程应用[D]. 天津: 天津大学, 2014: 46.
Jia X. The mechanical properties test of artificial frozen soil and project application in Tianjin [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 46.
- [18]赵文美. 高纬度多年冻土物理力学性质研究[J]. *森林工程*, 2015, 31(3): 128-130, 135.
Zhao W M. Study on physical and mechanical properties of permafrost at high altitudes [J]. *Forest Engineering*, 2015, 31(3): 128-130, 135.