



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309415

引用格式:郭浩天,林昱利,王哲,等.温度对不同饱和状态全风化泥岩抗剪强度的影响[J].科学技术与工程,2025,25(2):729-736.

Guo Haotian, Lin Yuli, Wang Zhe, et al. Effect of temperature on shear strength of fully weathered mudstone at different saturations[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(2): 729-736.

温度对不同饱和状态全风化泥岩抗剪强度的影响

郭浩天^{1,2}, 林昱利¹, 王哲¹, 孙超^{1,2}

(1. 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 长春 130118; 2. 吉林建筑大学季冻区岩土工程研究所, 长春 130118)

摘要 为研究温度对不同饱和状态全风化泥岩抗剪强度的影响,以典型季冻区全风化泥岩试样为研究对象,利用 GDS 非饱和和试验系统,对饱和状态及天然非饱和状态下的全风化泥岩分别进行室内三轴试验,研究不同温度对其抗剪强度参数的影响,并对比分析饱和状态及天然非饱和状态下全风化泥岩抗剪强度参数之间的区别。结果表明:全风化泥岩强度受饱和度与温度影响较大。随温度降低两种土样的黏聚力均增加,内摩擦角均先增加再减小。温度与试验系统条件一致时,非饱和全风化泥岩试样黏聚力始终大于饱和全风化泥岩试样。饱和度对试样的内摩擦角影响较小,两种土样的内摩擦角分别在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到峰值。研究成果可为季冻区不同饱和状态全风化泥岩地层中,工程的设计施工及方案优化过程中力学参数的选取等方面提供理论参考和指导。

关键词 全风化泥岩; 三轴试验; 抗剪强度参数; 温度

中图分类号 TU452;

文献标志码 A

Effect of Temperature on Shear Strength of Fully Weathered Mudstone at Different Saturations

GUO Hao-tian^{1,2}, LIN Yu-li¹, WANG Zhe¹, SUN Chao^{1,2}

(1. School of Geometrics and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering in the Seasonal Frozen Region, Jilin Jianzhu University, Changchun, 130118, China)

[Abstract] In order to study the effect of temperature on the shear strength of fully weathered mudstone with different saturations, fully weathered mudstone specimens from a typical seasonal frozen region were used as the object of study. The GDS dynamic triaxial test system and the GDS unsaturated test system were used to conduct indoor triaxial tests on specimens with different saturations to investigate the trends of the shear strength parameters of fully weathered mudstone in the seasonal frozen region under different temperatures and surrounding pressures, and to compare and analyse the shear strength parameters of the two different saturations of the fully weathered mudstone were compared and analysed. The results show that the fully weathered mudstone is strongly influenced by saturation and temperature. The cohesion of both soil samples increases with decreasing temperature, and the internal friction angle increases and then decreases. The cohesion of the unsaturated mudstone specimens is consistently greater than that of the saturated mudstone specimens when the temperature and test system conditions are consistent. Saturation has a low effect on the internal friction angle of the specimens, which peaks at $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the two soil samples respectively.

[Keywords] fully weathered mudstone; triaxial test; shear strength parameters; temperature

长春市作为典型季冻区,每年冬季室外温度最低可达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大冻深范围深达两米。近些年长春地区冬季气温已多次达到最低温度,这给冬季施工无疑造成了巨大的困难,解决季冻区施工困难也成为长春地区近年来的重要问题之一。随着国家“一带一路”倡议的实施,长吉图地区(长春市、吉林市部分区域、延吉州)成为东北亚区域的核心。长春地区作为建设规划中“中蒙俄经济走廊”的节点城市,会有许多地上、地下新建项目的产生,在地铁

站台、高层建筑等工程建设开挖深基坑的过程中,发现全风化泥岩在该地区分布较为广泛,因此对季冻区全风化泥岩的力学性质进行研究具有重要的实际意义。

泥岩属于软质黏土,是陆源碎屑沉积最细的族系部分,其组分泥质细粒通常是以水力悬浮方式由河流搬运到沉积盆地,大多数泥质悬浮物是以集合粒(絮凝团)沉淀的^[1]。泥岩的主要矿物组成是黏土矿物,其风化物是泥岩在遭受各种不同类型风化

收稿日期: 2023-11-30; 修订日期: 2024-10-22

基金项目: 中国科协青年人才托举工程项目(2021QNRC001); 吉林省科技发展计划(YDZJ202201ZYTS490)

第一作者: 郭浩天(1991—),男,汉族,安徽肥东人,博士,讲师。研究方向: 土体工程地质。E-mail: guohaotian@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

作用后的产物,具有黏粒含量高、坚硬但不致密、亲水性强、浸水后强度迅速降低^[2]等特点。泥岩多是由各种作用形成的固结岩石,其有着物质成分复杂,遇水易软化、膨胀,失水易硬化、干裂的缺点。为明确泥岩力学性质并应用于实际工程中,中外学者在影响因素、不同种类泥岩力学性质的对比方面对泥岩的抗剪强度进行了诸多研究。余宏明等^[3]对红色风化泥岩进行分析,通过室内试验研究试样含水量、密度、黏粒含量与抗剪强度参数之间的关系。湛文武等^[4]通过室内试验对全风化灰绿色及红色泥岩进行力学性质上的对比,发现当含水率超过一定值时,两种泥岩都会失去抗剪能力。邹建文^[5]对红层泥岩及其重塑试样的微观结构与抗剪强度的关系展开研究。从含水率、干密度和制样方法三种角度进行分析,研究不同条件变化对试样黏聚力及内摩擦角的影响趋势。樊金平等^[6]为研究干湿循环对泥岩抗剪强度的影响,通过一种新式的干湿循环直剪试验对胶东地区白垩系泥岩进行试验分析。试验结果指出:在干湿循环作用下,泥岩两种抗剪强度指标均有所下降。张青波等^[7]对 Karawang 地区的全风化泥岩及强风化泥岩展开研究,研究其抗剪强度的影响因素,为该地区路堑边坡的防护与治理提供帮助。结果表明:含水率较干湿循环次数相比对抗剪强度的影响更大。耿帆等^[8]选取预崩解炭质泥岩为研究对象,从荷载及干湿循环两种角度展开研究,分析两种条件对泥岩抗剪强度的影响。结果表明泥岩抗剪强度随法向应力的增加而增加,但与竖向荷载和循环时间均呈现正比,随循环次数增加而降低。李永志等^[9]以膨胀性红层泥岩为研究对象,通过直剪试验研究试样在不同含水率下抗剪强度的变化规律。结果显示:膨胀性泥岩含水率越高,其抗剪强度变化趋势将呈现先升高后降低的趋势。Chen 等^[10]通过扫描电子显微镜研究含水量对泥岩强度的影响,并得到泥岩的吸水特性。基于试验结果进行分析,建立泥岩的多孔介质力学模型。刘先锋等^[11]选取红层泥岩为研究对象,从不同干密度和含水率两种角度对泥岩进行直剪试验,揭示了该泥岩在不同干密度和含水率状态下抗剪强度的变化趋势。尽管目前中外学者对泥岩的抗剪强度方向有了一定研究,但对风化泥岩的研究较少。泥岩风化程度的增加会使原岩结构损坏,风化程度达到完全时,泥岩结构基本破坏,虽然仍旧属于基岩但却拥有土的性质。因此对风化泥岩的研究,还需要国内外学者进一步探索。

目前,专家学者们对各地区泥岩抗剪强度方向有了较多了解,但考虑温度对不同饱和度全风化泥

岩抗剪强度的研究还存在不足,基于此,现对饱和及天然非饱和状态下的全风化泥岩在不同温度条件下进行三轴剪切试验,获得不同影响因素下全风化泥岩的内摩擦角、黏聚力,分析温度对全风化泥岩抗剪强度参数的影响,并将天然状态和饱和状态两种不同饱和度的全风化泥岩相互对比,分析饱和度变化对其产生的影响,以期能为工程设计施工提供理论参考和指导。

1 土样基本性质

研究土样取自位于吉林省长春市绿园区,试验土样为全风化泥岩原状样,取样深度为 8 ~ 10 m,取样间距为 1.5 ~ 2.0 m。基于《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[12]通过室内试验对 10 组土样的基本物化性质进行测定和计算,所得全风化泥岩试样颗粒级配曲线、不均匀系数及曲率系数、粉粒与黏粒及砂粒百分含量、密度、天然含水率、孔隙比、液塑限及塑性指数等测试结果如图 1 ~ 图 8 所示。

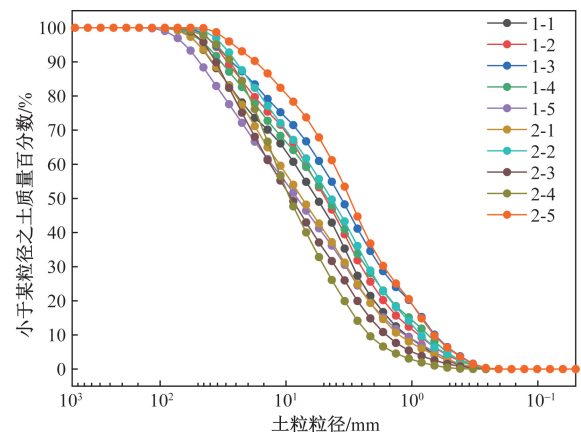


图 1 全风化泥岩试样颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle grading curves of fully weathered mudstone specimens

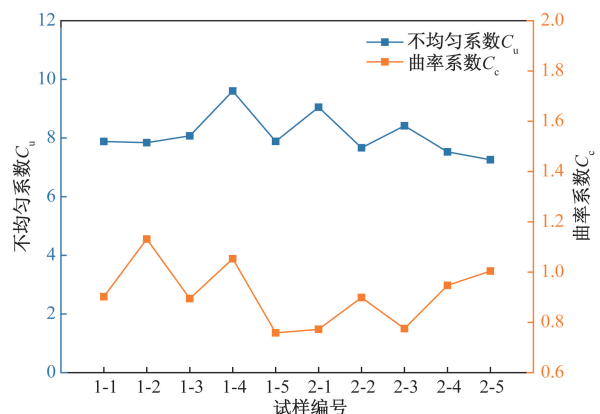


图 2 全风化泥岩试样不均匀系数及曲率系数

Fig. 2 Unevenness coefficient and curvature coefficient of fully weathered mudstone specimens

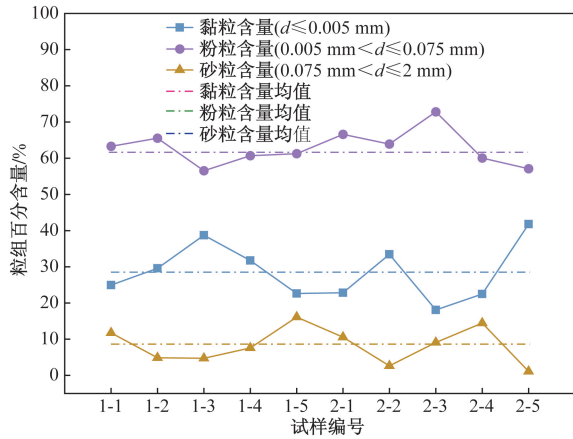


图3 土样粉粒、黏粒及砂粒百分含量

Fig. 3 Percentage of powder, clay and sand in soil samples

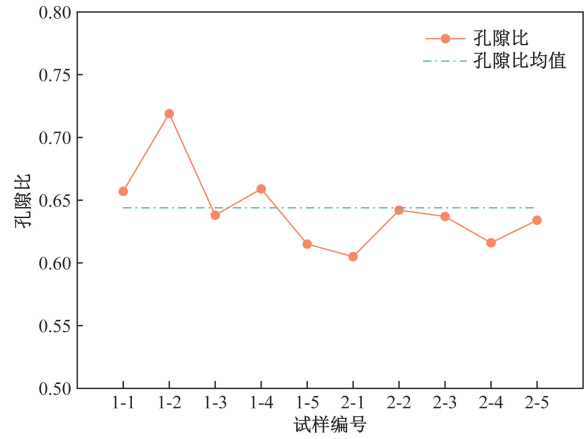


图6 泥岩试样孔隙比及其均值统计图

Fig. 6 Statistical plots of pore ratios and their mean values for mudstone specimens

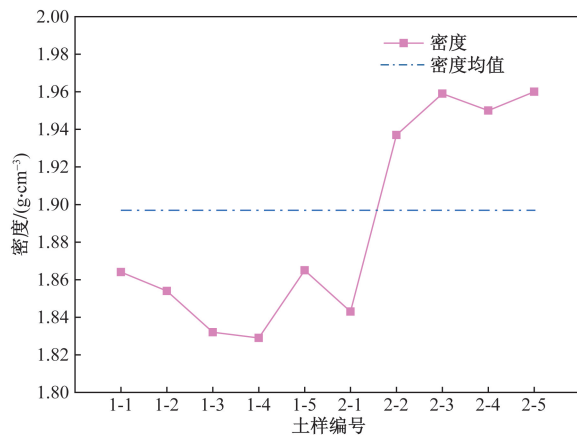


图4 土样密度

Fig. 4 Soil sample density

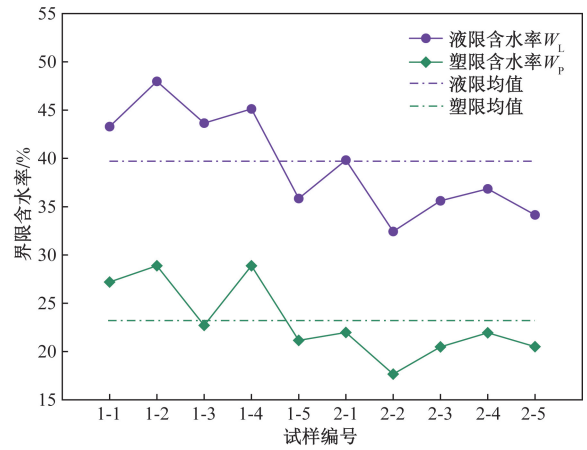


图7 土样液塑限

Fig. 7 Liquid-plastic limit of a soil sample

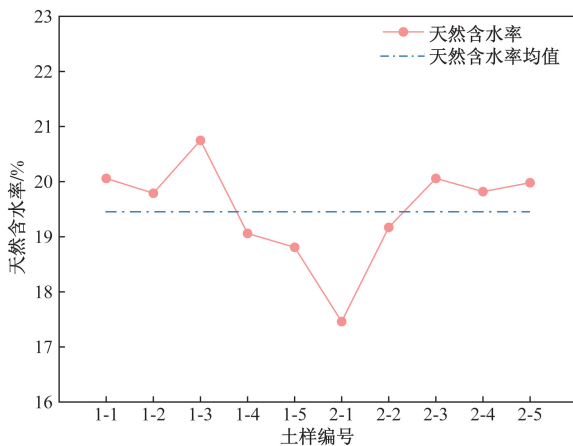


图5 原状泥岩试样含水率及其均值统计图

Fig. 5 Statistical plots of water content and its mean value for in-situ mudstone specimens

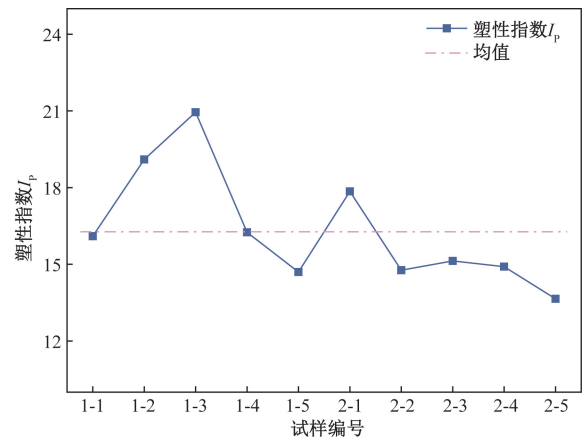


图8 土样塑性指数

Fig. 8 Plasticity index of soil samples

由图3可知,土样粉粒占总量的56.53%~72.82%,平均62.78%,黏粒占18.1%~41.8%,平均28.63%,砂粒占1.09%~16.11%,平均8.29%。分析结果数据可知,试验所采用的全风化泥岩试样

中粉粒含量占比较高,平均占比超过55%。这种情况会导致土体受饱和度影响较为严重,含水率的变化对土体抗剪强度的影响较大,更容易受温度影响。

由图4~图8可知,天然状态下土体密度的范

围在 $1.83 \sim 1.96 \text{ g/cm}^3$, 计算得到其平均湿密度 1.89 g/cm^3 。土样孔隙比的范围为 $0.61 \sim 0.72$, 平均孔隙比 0.64 , 用烘干法测算含水率范围为 $17.46\% \sim 20.75\%$, 平均含水率 19.50% 。通过室内试验中的土壤液塑限联合测定仪测得塑限含水率范围在 $17.66\% \sim 28.88\%$, 平均塑限含水率为 23.14% , 液限含水率范围在 $32.43\% \sim 47.98\%$, 平均液限含水率为 39.48% 。

10 组试样液性指数均小于 0, 塑性指数范围在 $13.65 \sim 20.95$, 平均塑性指数为 16.34 。依据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[13], 可知该全风化泥岩属于黏土, 处于坚硬状态。

由全自动固结仪测算所得压缩模量如图 9 所示, 可知压缩模量范围为 $9.04 \sim 11.7 \text{ MPa}$, 平均压缩模量为 10.48 MPa , 压缩系数范围为 $0.14 \sim 0.19 \text{ MPa}^{-1}$, 平均压缩系数为 0.158 MPa^{-1} 。根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[1] 的规定, 土样的压缩系数在 $0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}^{-1}$, 说明该地区的全风化泥岩可判定为中压缩性土。

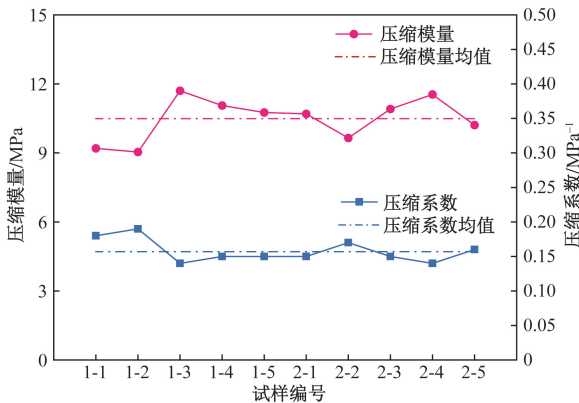


图 9 试样压缩模量及压缩系数统计图

Fig. 9 Specimen compression modulus and compression coefficient statistical graphs

泊松比是对土体进行力学评价和数值计算的重要参数, 表现了土的弹性性质。Alpan^[14] 提出了将黏性土的静止侧压力系数与塑性指数进行关联, 得到

$$K_0 = 0.19 + 0.23I_p \quad (1)$$

式(1)中: K_0 为静止侧压力系数; I_p 为塑性指数。

利用式(1)计算得到试样的静止侧压力系数, 将其代入式(2)后可以得到 10 组试样的泊松比如图 10 所示。以上 10 组试样泊松比范围为 $0.311 \sim 0.331$, 计算其平均值为 0.319 。

$$v = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (2)$$

式(2)中: v 为泊松比。

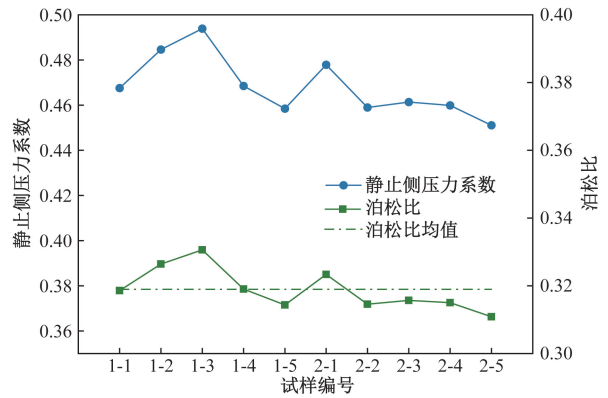


图 10 试样泊松比及静止侧压力系数联合统计

Fig. 10 Joint statistics of Poisson's ratio and static lateral pressure coefficient of specimens

2 试验设备及方案

2.1 试验设备

试验采用 GDS 非饱和三轴试验系统(图 11), 该测试系统由压力控制器、双压力室和数据采集系统 3 个部分组成。压力控制室主要负责提供和控制轴压、围压、孔隙气压、孔隙水压和温度等试验变量; 双压力室装置则分别由内压力室和外压力室两个装置组成; 数据采集系统则由电脑, 传感器和数据采集板合并连接组成。3 个系统相互连接, 由压力控制器提供思维应力路径, 数据采集系统对试验得到的数据进行采集转换, 整个实验过程由电脑软件实时检测操控。

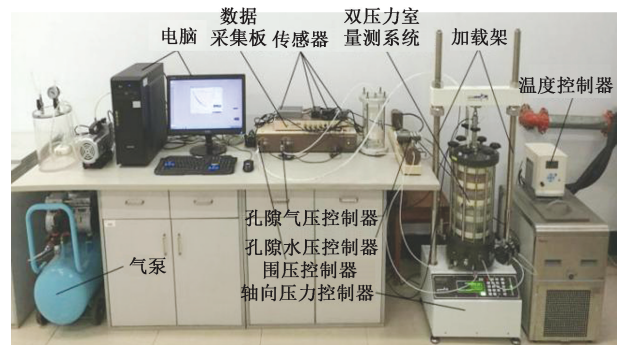


图 11 非饱和土三轴实验仪器

Fig. 11 Triaxial experimental apparatus for unsaturated soil

2.2 试验方案

取相同深度范围内的 5 组原状全风化泥岩试样, 每组土样削出 3 个三轴试样, 共计 15 个 $38 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$ 的三轴试样。以长春地区全风化泥岩土-水特征曲线为标准, 可知原状试样在天然含水率状态下所对应的基质吸力约为 210 kPa 。

开始试验前需要对试样进行抽真空饱和, 通过施加指定的基质吸力使泥岩试样达到特定的非饱

和状态。试验采用固结不排水三轴剪切试验方法,初始基质吸力为0、210 kPa,考虑到所取土样的实际情况和取土埋藏深度,围压分别设置为100、200、300 kPa。温度设置5个阶段,20、0、-5、-10、-20℃,冻结时间设计为12 h。设置剪切速率为0.08 mm/min,轴向形变达到15%时终止剪切。

试验结束后通过得到的数据绘制应力应变曲线图,其最值为试样的最大偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$),由此可得到摩尔应力圆与x轴相交的左右两个交点,通过3个不同围压的摩尔应力圆,取其公切线,即为抗剪强度包线,与y轴的交点为黏聚力c,与x轴形成的锐角为内摩擦角 φ 。不同温度下试验参数设置如表1所示。

表1 不同温度条件下非饱和全风化泥岩三轴试验参数

Table 1 Parameters of triaxial test of unsaturated fully weathered mudstone under different temperature conditions

试样编号	基质吸力/kPa	温度/℃	净围压/kPa	孔隙气压/kPa	孔隙水压/kPa
1-1-1			100		
1-1-2	0、210	20	200	215	5
1-1-3			300		
1-2-1			100		
1-2-2	0、210	0	200	215	5
1-2-3			300		
1-3-1			100		
1-3-2	0、210	-5	200	215	5
1-3-3			300		
1-4-1			100		
1-4-2	0、210	-10	200	215	5
1-4-3			300		
1-5-1			100		
1-5-2	0、210	-20	200	215	5
1-5-3			300		

3 试验结果及分析

3.1 温度对非饱和全风化泥岩抗剪强度的影响

通过非饱和土三轴试验仪对原状全风化泥岩进行不同温度下的三轴剪切试验,试验成果如表2所示。

试验测得初始基质吸力210 kPa全风化泥岩的抗剪强度参数随温度变化如图12所示。由黏聚力变化曲线图中可知,温度对黏聚力影响较大,在其他条件不变的情况下,黏聚力与温度呈现负相关趋势,且在负温时变化的趋势远大于正温条件下变化大小。温度从20℃降到0℃时,黏聚力提升了近8倍,由57.93 kPa达到了452.36 kPa。0℃降低到-5℃时,增长速率有所减缓,但从-5℃开始继续降低温度时,黏聚力斜率变化显著,这是因为土体内部的联结由水转换成了冰,联结强度提升导致黏聚力升高。

温度变化对土体黏聚力影响变化较大,但对内摩擦角影响较为不稳定。由图12可知,内摩擦角在-5℃时达到最大,温度的升高与降低均使内摩擦角减小,距离-5℃越远,变化越小,在-5℃左右时,内摩擦角变化趋势达到最大峰值。

表2 不同温度下210 kPa初始基质吸力的全风化泥岩三轴试验成果记录表

Table 2 Recorded results of triaxial tests on fully weathered mudstone with 210 kPa initial matrix suction at different temperatures

温度/℃	净围压/kPa	偏应力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
-20	300	5 206.6		
	200	5 084.5	16.11	1 866.16
	100	5 058.6		
-10	300	4 207.7		
	200	4 026.6	28.37	1 092.8
	100	3 845.5		
-5	300	3 117		
	200	2 753.4	40.18	470.47
	100	2 389.7		
0	300	2 205.9		
	200	2 017.8	29.06	452.36
	100	1 828.2		
20	300	360.8		
	200	3 09.1	15.35	57.93
	100	217.8		

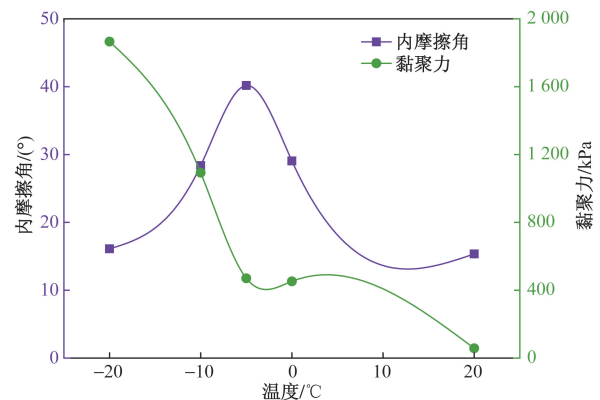


图12 非饱和土黏聚力及内摩擦角变化曲线图

Fig. 12 Unsaturated soil cohesion and angle of internal friction variation plot

3.2 温度对饱和全风化泥岩抗剪强度的影响

通过非饱和土三轴试验仪对饱和状态的长春地区全风化泥岩进行不同温度下的三轴剪切试验,试验结果如表3所示。

温度变化对饱和土黏聚力及内摩擦角的影响曲线如图13所示,由图13可知,黏聚力随温度降低不断上升,且负温的增长速度远超过正温时的增长速度。由20℃降至0℃时,黏聚力仅从28.39 kPa

提升至 55.38 kPa,提升幅度只有 2 倍左右。而在负温条件下,随着温度不断降低,从 0 °C 降到 -20 °C,黏聚力变化明显,从 0 °C 的 55.38 kPa 提升至 -20 °C 的 1431.53 kPa,提升幅度约为 26 倍。

表 3 不同温度下饱和全风化泥岩三轴试验结果

Table 3 Record of results of triaxial tests on saturated fully weathered mudstone at different temperatures

基质吸力/kPa	温度/°C	净围压/kPa	偏应力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
		300	4 230.7		
	-20	200	4 103.3	18.11	1 431.53
		100	4 053.0		
		300	3 237.0		
	-10	200	2 978.6	29.61	765.97
		100	2 854.0		
		300	2 266.1		
0	-5	200	1 988.2	35.56	368.42
		100	1 710.3		
		300	1 267.6		
	0	200	950.6	39.42	55.38
		100	572.8		
		300	343.6		
	20	200	259.6	17.95	28.39
		100	165.5		

饱和全风化泥岩在各温度的黏聚力皆小于 210 kPa 基质吸力下的非饱和全风化泥岩。经分析可知,温度降低导致土体内部黏聚力大幅度降低的原因在于土体内部孔隙中的水分受到温度降低的影响,由原来的水颗粒转变成了冰晶,温度越下降则冰晶含量越多,变相地提升了土颗粒之间的黏结强度。当土体处于正温时,温度的下降不会导致冰晶含量增加,对土体内部的黏结强度影响有限,故对土体黏聚力影响较小。

图 13 反映了内摩擦角随温度的变化,由图 13 可知,内摩擦角随温度的变化呈倒 V 形,0 °C 时内摩擦角达到最大值,0 °C 附近温度的升高和降低都会使内摩擦角减小。经分析可知,内摩擦角反映的是土体内部颗粒之间的摩擦移动关系,当温度降低到 0 °C 以下时,水与冰相互转换,冰晶的产生使得土颗粒间的联结作用降低,进而导致内摩擦角降低。

3.3 结果对比分析

不同温度下饱和与非饱和全风化泥岩抗剪强度参数对比如表 4 所示,不同饱和度全风化泥岩随温度变化时的黏聚力及内摩擦角如图 14 和图 15 所示。由图表可知,饱和与非饱和全风化泥岩黏聚力与内摩擦角的变化趋势基本相同,随着温度降低两种饱和度试样的黏聚力均不断增加,当低于一定温度后再继续降低时,黏聚力增加速度逐渐变缓。而

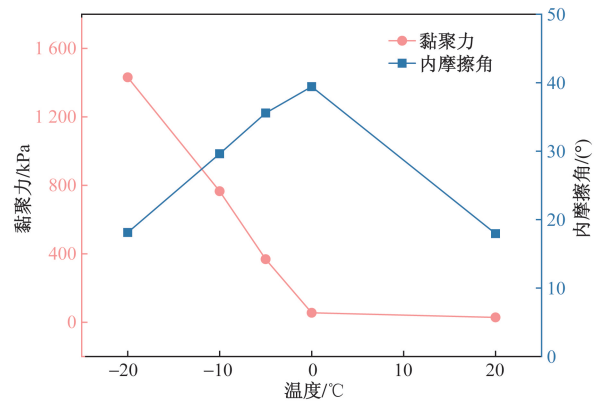


图 13 饱和土黏聚力及内摩擦角随温度变化曲线图

Fig. 13 Plot of variation of cohesion and angle of internal friction of saturated soil with temperature

表 4 不同温度下饱和与非饱和全风化泥岩抗剪强度参数对比统计表

Table 4 Comparison statistics of shear strength parameters of saturated and unsaturated fully weathered mudstone at different temperatures

温度/°C	210 kPa 基质吸力		0 kPa 基质吸力	
	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
-20	1866.16	16.11	1431.53	18.11
-10	1092.8	28.37	765.97	29.61
-5	470.47	40.18	368.42	35.56
0	452.36	29.06	55.38	39.42
20	57.93	15.35	28.39	17.95

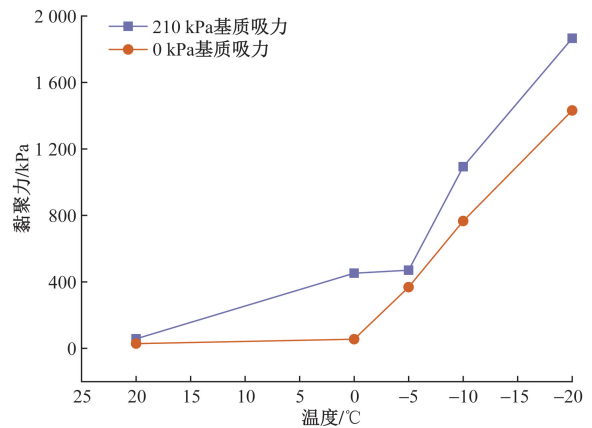


图 14 黏聚力变化对比图

Fig. 14 Comparison of changes in cohesion

饱和度的变化对内摩擦角的影响较小,且变化幅度不大。当试验仪器与温度条件一致时,非饱和全风化泥岩原状试样的黏聚力均大于饱和全风化泥岩试样的黏聚力。且温度降至负温时,温度越低,二者之间差距越明显。不同饱和度条件下的全风化泥岩内摩擦角均呈现倒 V 字形的变化趋势。皆在 0 °C 与 -5 °C 处内摩擦角达到最大,温度升高或降低均使内摩擦角减小。非饱和土的黏聚力始终大

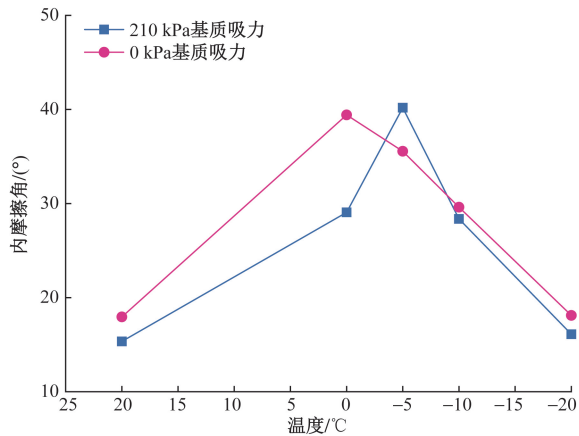


图 15 内摩擦角变化对比图

Fig. 15 Comparison of changes in angle of internal friction

于饱和土的黏聚力是由于粉粒含量较高,随着饱和度的升高,土中自由水含量增加,使得土中的胶结物质被溶解,起到润滑的作用,从而使黏聚力和内摩擦角均减小。

4 结论

通过室内三轴试验对长春地区全风化泥岩进行试验研究,分析其不同温度条件下饱和状态与天然非饱和状态下试样的抗剪强度参数变化规律,由试验结果得出以下结论。

(1) 由于全风化泥岩试样中的粉粒含量较高,且因粉粒具有较好的持水性能使得土体受饱和度和温度的影响较大。因此温度与饱和度均会影响土体的抗剪强度参数。

(2) 随着温度降低土中水分产生水冰相变,土体颗粒间冻结联结强度增加,使得负温时,温度变化对两种饱和度全风化泥岩试样的黏聚力影响较大,温度越低黏聚力相对越大。

(3) 当温度高于冻结温度时,土中存在具有润滑作用的未冻水,随温度降低,土体颗粒之间嵌锁咬合力因未冻水含量的减少而增大,内摩擦角逐渐增加,并分别在 0 °C 和 -5 °C 时达到峰值。当温度低于 0 °C 和 -5 °C 时土孔隙中冰晶的产生使得全风化泥岩颗粒间嵌锁咬合作用降低,内摩擦角减小。

(4) 由于饱和度的增加会使得土中自由水含量增加,土中胶结物质被溶解,因此在控制其他条件一致时,原状非饱和全风化泥岩试样的黏聚力始终大于饱和试样的黏聚力,且两种试样黏聚力的变化规律一致,均为随温度减小而增加。但饱和度的变化对内摩擦角影响较小,整体随温度增加呈现倒 V 字形变化趋势。

(5) 温度与饱和度对全风化泥岩的抗剪强度参

数的影响较为明显。研究结果可为季冻区不同饱和度和全风化泥岩地层工程设计、施工及方案优化过程中参数的选取等方面提供理论参考和指导。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范 GB50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB50007—2011 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.
- [2] 纪文奇, 费涵昌. 泥岩风化物的工程特性与应用[J]. 工程勘察, 1999, 7(2): 8-10. Ji Wenqi, Fei Hanchang. Engineering properties and applications of mudstone weatherings[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1999, 7(2): 8-10.
- [3] 余宏明, 胡艳欣, 唐辉明. 红色泥岩风化含砾粘土的抗剪强度参数与物理性质相关性研究[J]. 地质科技情报, 2002(4): 93-95. Yu Hongming, Hu Yanxin, Tang Huiming. Correlation between shear strength parameters and physical properties of weathered gravelly clays from red mudstone[J]. Geological Science and Technology Information, 2002(4): 93-95.
- [4] 谌文武, 林高潮, 刘伟, 等. 全风化灰绿色及红色泥岩物理力学性质对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2572-2582. Chen Wenwu, Lin Gaochao, Liu Wei. Physical and mechanical properties of weathered green and red mudstones[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2572-2582.
- [5] 邹建文. 红层泥岩及其重塑土微结构与抗剪强度关系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019. Zou Jianwen. Study on the relationship between microstructure and shear strength of red mudstone and its remolded soil[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [6] 樊金平. 胶东白垩系泥岩干湿循环抗剪强度试验研究[J]. 铁路工程技术与经济, 2020, 35(6): 23-28. Fan Jinping. Study on shear strength of cretaceous mudstone under dry-wet cycles in eastern Shandong[J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2020, 35(6): 23-28.
- [7] 张青波, 吴凯. Karawang 地区全风化泥岩抗剪强度及膨胀特性研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(8): 15-19, 86. Zhang Qingbo, Wu Kai. Research on the strength and expansive characteristics of full weathered mudstone in Karawang Area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(8): 15-19, 86.
- [8] 耿帆, 刘杰. 荷载与干湿循环作用下预崩解炭质泥岩抗剪强度及渗透特性[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 357-362. Geng Fan, Liu Jie. Shear strength and permeability characteristics of pre-disintegrated carbonaceous mudstone under loading and wet-dry cycles[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 357-362.
- [9] 李永志, 王世明, 邹建文, 等. 膨胀性泥岩抗剪强度与含水率相关性机理[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2857-2864. Li Yongzhi, Wang Shiming, Zou Jianwen. Correlation research between shear strength and moisture content of swelling mudstone[J].

- Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2857-2864.
- [10] Chen F, Sun X M, Lu H. Influence of water content on the mechanical characteristics of mudstone with high smectite content [J]. *Geofluids*, 2022, 2022. DOI:10.1155/2022/9855213.
- [11] 刘先峰, 马杰, 袁胜洋, 等. 干密度和含水率对压实红层泥岩路基填料强度特性的影响研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(10): 2910-2918.
Liu Xianfeng, Ma Jie, Yuan Shengyang. Experimental research on the influence of dry density and water content on the strength characteristics of compacted red mudstone fill material[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(10): 2910-2918.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准(GB/T 50123—2019) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method(GB/T 50123—2019) [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩土工程勘察规范: GB50021—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for geotechnical investigation: GB50021—2001 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2002.
- [14] Alpan I. The empirical evaluation of the coefficient K_0 and K_0 OCRJ[J]. *Soils and foundations*, 1967, 7(1): 31-40.