doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202502009

非饱和全风化泥岩SWCC及强度特性试验研究

周润健[1],胡　锋[2],王　哲[3]

(1.湖州湖皖高速公路有限公司,浙江 湖州　313000;
2.浙江杭长高速公路有限公司,浙江 湖州　313000;
3.吉林建筑大学 测绘与勘查工程学院,吉林 长春　130118)

摘要:为研究非饱和全风化泥岩土水特征及抗剪强度,通过压力板仪进行土水特征试验,并基于试验结果进行非饱和、饱和三轴剪切试验。结果表明:天然状态下的非饱和全风化泥岩具有弱透水性、毛细现象显著的特点;天然含水率为19.15%的全风化泥岩具有210 kPa的基质吸力,同一基质吸力下,总黏聚力随温度的降低逐渐增大;正温时,随着温度的降低,有效摩擦角增大,负温时,温度越低,有效内摩擦角越小。

关键词:全风化泥岩;土-水特征试验;三轴剪切试验;基质吸力;抗剪强度

中图分类号:TU452　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2025)02-0060-11

中国已制定出台加快建设交通强国重大工程和重大项目,大型交通工程项目的新建工作将如火如荼地展开,而这一深度范围内常常遇到全风化泥岩。部分施工如基坑开挖、隧道施工、地铁建设等亟需在冬季完成,复杂的水文、地质条件、温度条件直接影响地下结构的安全与投资,因此研究全风化泥岩的土水特征及不同温度对非饱和全风化泥岩及饱和全风化泥岩强度、变形特性的影响,对地下工程建设具有实际意义。

非饱和土是由固相、液相、气相三元介质组成,在非饱和土的渗流分析中,土体的储水能力并不是一个常数,而是与吸力的变化相关。土水特征曲线表示的就是含水率与吸力的函数关系[1-2],基于土水特征曲线可以计算非饱和土的渗透系数[3],推测土的强度[4]。众多学者在非饱和土的土水特征曲线研究方面前赴后继,推动了理论模型[5-7]和试验方法[8]的进步。但是针对全风化泥岩进行土水特征曲线的研究较少,多集中于原状土和重塑土的保水性能以及孔径分布规律[9-10]、冻融循环对泥岩的影响[11-13]、全风化泥岩的膨胀特性[14]等方面。研究全风化泥岩的土水特征,对全风化泥岩的土坝渗流、边坡强度、地基变形等做出合理防治措施具有重要意义。

土水特征曲线虽然可以预测土的强度,但是三轴剪切试验作为一种常用的室内试验方法更能精确测定土的应力-应变关系和抗剪强度,并且试样内应力和应变相对均匀,状态明确,量测简单可靠。Wen等[15]研究了灌溉水对风化红泥岩抗剪强度的影响,发现灌溉水的侵蚀作用导致风化红泥岩抗剪强度降低。Kong等[16]研究了风化膨胀泥岩的工程特性,泥岩具有明显的膨胀和收缩行为,膨胀试样的抗剪强度明显低于不饱和试样。Zhang等[17]研究探讨了雨水软化对红层泥岩的影响,结果表明软岩结构发生改变,导致其强度逐渐退化。泥岩表现出向土体转化的趋势,其内摩擦角和黏聚力均呈现由快到慢的递减规律。部分学者还对不同含水率的泥岩开展蠕变试验,获取应变-时间关系,分析蠕变过程和蠕变特征建立适宜的蠕变模型[18-20],本研究主要针对红层泥岩或强风化泥岩等展开,而针对不同温度条件下非饱和(饱和)全风化泥岩的抗剪强度和变形特征的研究则相对较少。

在实际工程勘探时,泥岩多处于非饱和状态,且在季冻区一定深度处分布广泛。故文章通

收稿日期:2024-12-23

作者简介:周润健(1998—),男,安徽宣城人,助理工程师,硕士,主要研究方向为公路工程、边坡工程和非饱和土力学。

过室内土工试验、土水特征试验、GDS非饱和土三轴剪切试验、GDS温控式静（动）三轴剪切试验，探究非饱和全风化泥岩的土水特征曲线和不同温度条件下的应力-应变关系以及抗剪强度，研究成果可对实际工程的设计与施工提供参考与指导。

1　试样基本性质

1.1　粒度成分分析

本试验全风化泥岩一共分为10组，其中1-1~1-5组为非饱和全风化泥岩，2-1~2-5组为饱和全风化泥岩，各组颗粒分析结果如图1所示，不均匀系数及曲率系数计算结果如图2a所示，各粒组质量百分含量如图2b所示。

由图2b可知，各粒组中黏粒含量为18.1%~41.8%，平均值为28.63%；粉粒含量为56.53%~72.82%，平均值为62.78%；砂粒为1.09%~16.11%，平均值为8.29%。显然，10组全风化泥岩中，粉粒、黏粒百分含量相对较高，砂粒较少，具有弱透水性、毛细现象显著的特点。

1.2　基本物理力学性质

明确试样的基本物理力学性质，对于研究分析温度变化对非饱和全风化泥岩应力-应变曲线、抗剪强度的作用机理具有重要作用。土工试验得出天然状态下的全风化泥岩的各项物理力学参数变化规律如图3所示，其变化范围以及平均值如表1所示。在外力作用下全风化泥岩中的三相介质（固体、液体、气体）均会产生位移，导致孔隙体积减小而发生压缩变形。

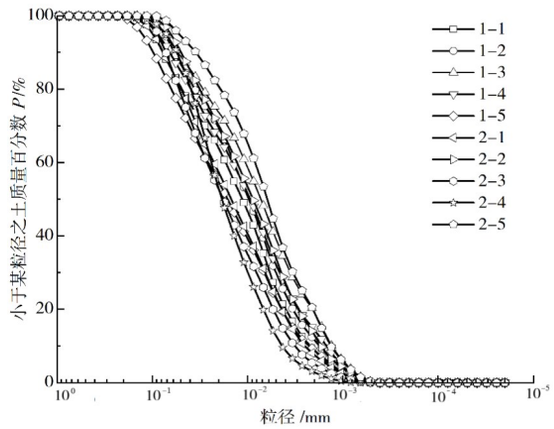


图1　10组全风化泥岩粒径级配

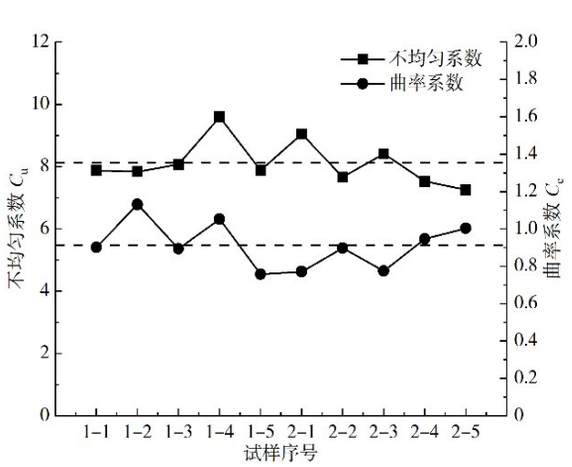
Fig. 1　10 groups of fully weathered mudstone particle size gradation

2　试验方案

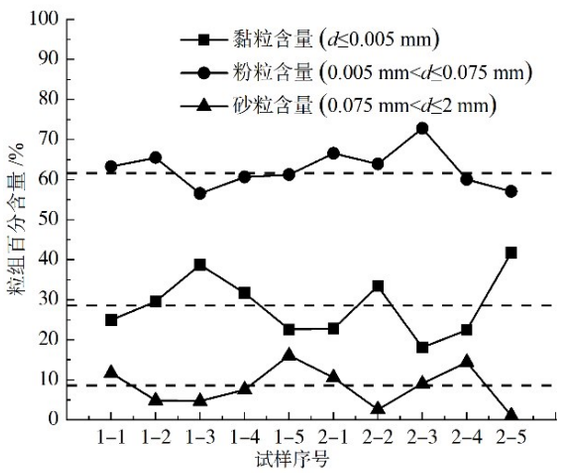
2.1　土-水特征试验

天然状态下全风化泥岩的土-水特征曲线（soil-water characteristic curve，SWCC）使用GEO-Experts土-水特征曲线压力板仪进行测定，研究全风化泥岩的持水能力，确定天然状态下的全风化泥岩的基质吸力。

本次试验吸力测试范围为0~450 kPa，试验的起始吸力为0 kPa；0~15 kPa时以5 kPa逐级递增，15 kPa后以25 kPa逐级递增；加至450 kPa，共21级。从而得到原状全风化泥岩压力板试验结果如表2所示，基质吸力与体积含水率的关系曲线如图4所示。



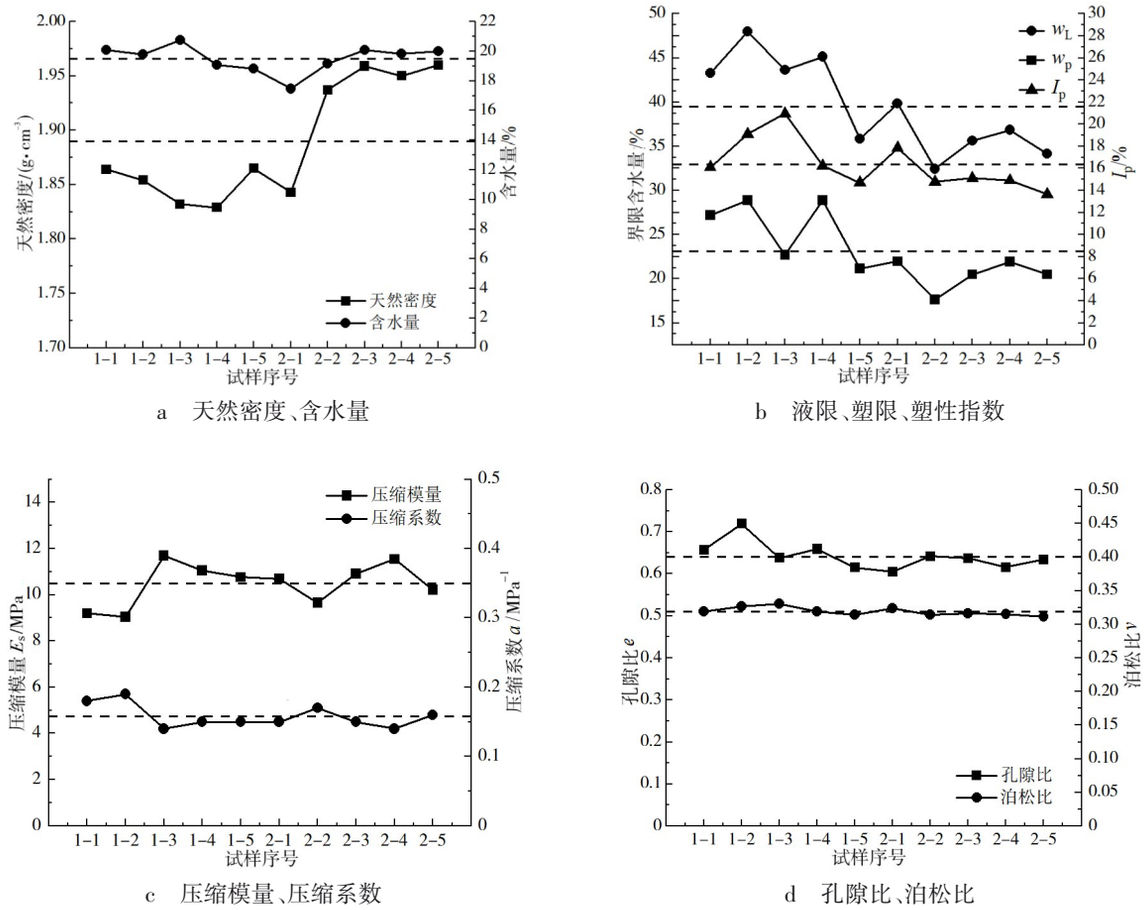
a　C_u、C_c



b　各粒组百分含量

图2　C_u、C_c和各粒组百分含量

Fig. 2　C_u、C_c and percentage content of each grain group



a　天然密度、含水量　　b　液限、塑限、塑性指数

c　压缩模量、压缩系数　　d　孔隙比、泊松比

图3　10组全风化泥岩的各项物理力学参数

Fig. 3　Physical and mechanical parameters of 10 groups of completely weathered mudstone

表1　试样的基本物理力学参数均值

Table 1　Range and average of basic physical and mechanical parameters of specimens

物理力学参数	范围	平均值
天然密度ρ/(g·cm^{-3})	1.83~1.96	1.89
天然含水率w/%	17.46~20.75	19.15
孔隙比e	0.61~0.72	0.64
液限w_L/%	32.43~47.98	39.48
塑限w_p/%	17.66~28.88	23.14
塑性指数I_p/%	13.65~20.95	16.34
压缩系数a/MPa^{-1}	0.14~0.19	0.158
压缩模量E_s/MPa	9.04~11.7	10.48
泊松比v	0.311~0.331	0.319

由表2可以推算,在天然含水率19.15%时,全风化泥岩具有210 kPa的基质吸力。由图4可知,当基质吸力为0~210 kPa时,全风化泥岩处于饱和状态;当基质吸力为210 kPa~300 kPa时,全风化泥岩达到典型的土-水特征曲线的第二阶段,此时体积含水率迅速下降,泥岩内部排出大量的重力水,同时基质吸力的增加还使得土颗粒间的毛细作用增强;当基质吸力在300 kPa~450 kPa时,体积含水率降低速率减缓,土颗粒孔隙中的毛细水逐渐被排出,最终将以结合水的形式存在。

2.2　非饱和全风化泥岩三轴试验

采用GDS非饱和土三轴测试系统对1-1~1-5组15个试样的非饱和全风化泥岩进行固结不排水三轴试验。根据全风化泥岩在天然含水率状态下的基质吸力210 kPa,将三轴试验基质吸力设定为210 kPa;参照规范标准及往期经验,试验净围压分别设定为100、200、300 kPa,剪切速率设定为0.08%/min,温度设定为20、0、-5、-10、-20 ℃。不同温度下的非饱和全风化泥岩三轴试验参数如表3所示。

试验时,利用削土器将原状泥岩削成38 mm×76 mm的圆柱体试样,而后进行抽真空饱和;施加

表 2　土-水特征曲线试验数据
Table 2　Soil-water characteristic curve test data

基质吸力/kPa	排水体积/mL	体积含水率θ_w/%	质量含水率ω/%	饱和度S/%
0	0. 00	37. 13	20. 99	100. 00
5	0. 12	37. 08	20. 89	99. 62
10	0. 13	37. 01	20. 77	99. 17
15	0. 06	36. 99	20. 75	99. 00
25	0. 28	36. 73	20. 66	98. 92
50	0. 23	36. 41	20. 57	98. 06
75	0. 23	36. 08	20. 39	97. 17
100	0. 24	35. 74	20. 19	96. 25
125	0. 26	35. 37	19. 98	95. 26
150	0. 09	35. 09	19. 82	94. 51
175	0. 33	34. 62	19. 55	93. 24
200	0. 18	34. 36	19. 41	92. 54
225	0. 78	33. 25	18. 78	89. 55
250	0. 70	32. 26	18. 21	86. 88
275	0. 74	31. 21	17. 61	84. 06
300	0. 73	30. 17	17. 12	81. 25
325	0. 35	29. 68	16. 73	79. 94
350	0. 32	29. 22	16. 47	78. 70
375	0. 30	28. 80	16. 23	77. 57
400	0. 26	28. 43	16. 02	76. 57
425	0. 08	28. 35	15. 98	76. 51
450	0. 22	28. 29	15. 33	75. 82

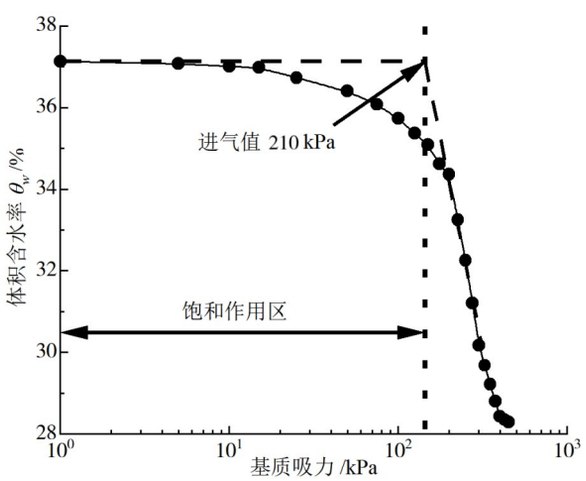


图 4　体积含水率与基质吸力关系
Fig. 4　Relationship between volumetric water content and matric suction

测定的基质吸力210 kPa，使泥岩试样达到所需的非饱和状态，然后进行三轴剪切试验；当轴向形变达到15%时终止剪切，从而得到非饱和全风化泥岩在不同温度、围压时的应力-应变曲线如图5所示。

2. 3　饱和全风化泥岩三轴试验

采用GDS温控式静（动）三轴测试系统对2-1~2-5组15个试样的饱和全风化泥岩进行固结不排水三轴试验，不同温度条件下的饱和全风化泥岩三轴试验参数设计如表4所示。

试验开始前对试样进行反压饱和；试验时，轴向应变每隔0. 5%取点一次，记录对应的偏应力取值，从而得到不同温度、围压时饱和全风化泥岩的应力-应变曲线如图6所示。

3　温度对非饱和全风化泥岩抗剪强度的影响

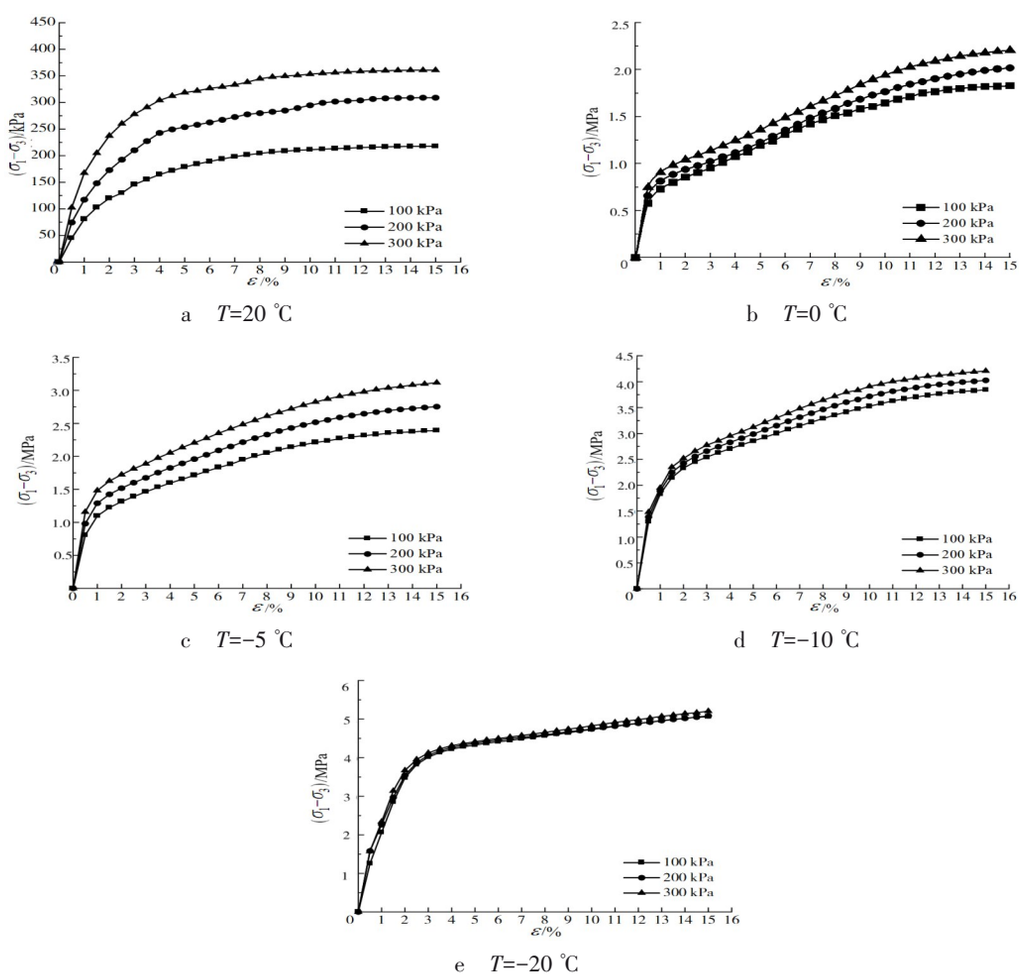
3. 1　试样应力-应变分析

由图5非饱和全风化泥岩在不同温度、围压时的应力-应变曲线可知，同一温度下应力-应变曲线变化趋势基本一致，整体呈正相关特点。具

表3　不同温度条件下非饱和全风化泥岩三轴试验参数设定

Table 3　Triaxial test parameters setting of unsaturated fully weathered mudstone under different temperature conditions

岩样编号	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	215	
1-1-2		20	200	215	5
1-1-3			300	215	
1-2-1			100	215	
1-2-2		0	200	215	5
1-2-3			300	215	
1-3-1			100	215	
1-3-2	210	-5	200	215	5
1-3-3			300	215	
1-4-1			100	215	
1-4-2		-10	200	215	5
1-4-3			300	215	
1-5-1			100	215	
1-5-2		-20	200	215	5
1-5-3			300	215	



a　T=20 ℃　　b　T=0 ℃

c　T=-5 ℃　　d　T=-10 ℃

e　T=-20 ℃

图5　非饱和全风化泥岩应力-应变曲线

Fig. 5　Stress-strain curve of complete-intense weathering mudstone

表4　不同温度条件下饱和全风化泥岩三轴试验参数表
Table 4　Triaxial test parameter table of saturated fully weathered mudstone under different temperature conditions

岩样编号	基质吸力/kPa	温度/℃	净围压/kPa
2-1-1			100
2-1-2		20	200
2-1-3			300
2-2-1			100
2-2-2		0	200
2-2-3			300
2-3-1			100
2-3-2	0	-5	200
2-3-3			300
2-4-1			100
2-4-2		-10	200
2-4-3			300
2-5-1			100
2-5-2		-20	200
2-5-3			300

体地说，在剪切初期，偏应力（$\sigma_1-\sigma_3$）增长速率较快；当应变增长至2%~4%时，偏应力增长速率开始减缓，但仍保持递增趋势。

由图5还可以看出，当围压不变时，温度越低，应力增长越快，说明温度对非饱和全风化泥岩的抗剪强度影响很大。具体地说，当温度为20 ℃时，围压逐级增大，固结过程中全风化泥岩颗粒之间的孔隙被压缩，黏结咬合力增大，结构变得更加密实，使得试样承受的剪应力随着围压的增大而增大，同时因基质吸力的作用，岩样中始终存在吸附强度，从而使得剪切过程中表现出一定的硬化特征；当温度从0 ℃下降至-20 ℃时，围压对岩样的影响力逐渐减弱，非饱和全风化泥岩内部自由水开始冻结，固体颗粒之间的联结形式发生改变，由原来的泥岩-水二元结构过渡为泥岩-水-冰三元结构，最终趋于泥岩-冰结构，联结形式的改变提高了结构的稳定性，且泥岩-冰结构在一定程度上可以弥补土体强度的损失。

3.2　试样的抗剪强度分析

基质吸力为210 kPa时，绘制不同温度时的莫尔-库伦应力圆及强度包线，如图7a所示，由此可以得出非饱和全风化泥岩的总黏聚力C以及有效内摩擦角φ如表5所示，总黏聚力和有效内摩擦角随温度变化曲线如图7b所示。

由图7b和表5可知，温度对非饱和全风化泥岩总黏聚力、有效内摩擦角的影响很大。泥岩颗粒间的有效黏聚力、基质吸力产生的表观黏聚力以及水冰相变产生的冰胶结黏聚力共同作用形成了总黏聚力，当温度为-20 ℃时，总黏聚力达到最大值1 866. 16 kPa；当温度为20 ℃时，总黏聚力达到最小值57. 93 kPa，最大值是最小值的32. 2倍，总黏聚力随温度的降低逐渐增大。

经分析可知，温度越低，水冰相变程度越高，泥岩-水结构逐渐向泥岩-冰结构转变，岩体内部的冰胶结黏聚力增大使得总黏聚力随之增大；温度降低还会导致吸附在泥岩颗粒表面孔隙水的黏滞性增强，使得有效黏聚力增大，故同一基质吸力时，温度越低总黏聚力越大。

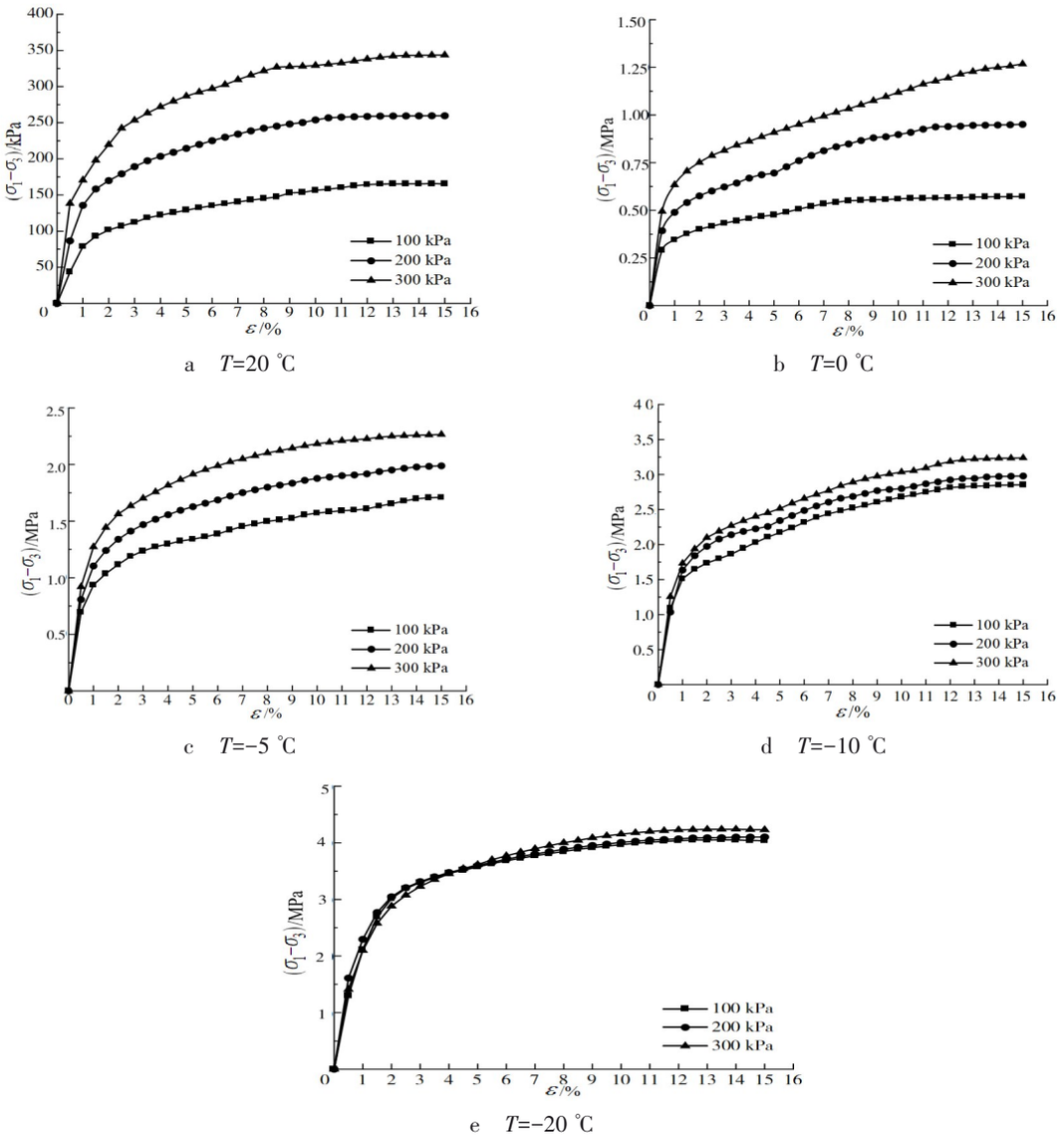
为了便于分析，根据岩土颗粒间的作用方式，将非饱和全风化泥岩的有效内摩擦角视为由基质吸力作用时的吸力摩擦角、全风化泥岩颗粒间的滑动摩擦角以及紧密排列的颗粒之间的镶嵌咬合的静摩擦角共同组成。当基质吸力恒定，温度从20 ℃下降至0 ℃时，有效内摩擦角逐渐增大，主要原因是正温时，随着温度的降低，孔隙水的黏滞性提高使得岩土颗粒间的润滑作用减弱，导致滑动摩擦角增大，故0 ℃时的有效内摩擦角大于20 ℃；当温度从-5 ℃下降至-20 ℃时，非饱和全风化泥岩中存在水冰相变产生的细微裂隙，且相变冰的润滑作用使得颗粒间的嵌入与联锁效果遭到不同程度的破坏，颗粒间发生相对滑动，使得静摩擦角及滑动摩擦角均降低，故而负温时，温度越低，有效内摩擦角越小。

4　温度对饱和全风化泥岩抗剪强度的影响

4.1　试样应力-应变分析

由图6饱和全风化泥岩在不同温度、围压时的应力-应变曲线可知，温度越低，围压对偏应力的影响越弱。具体地说，温度为-20 ℃时，围压对偏应力的影响很小；随着温度升高，围压对偏应力的影响越来越显著，20 ℃时300 kPa围压对应的偏应力趋于稳定后是100 kPa对应的偏应力稳定值的2倍。

围压改变的是试样承受剪应力的大小，对应力-应变曲线整体的形态特征影响较小。温度越低使得水冰相变程度越高，从而提高了岩体的强度，因此，温度较低时300 kPa的围压相对于试件



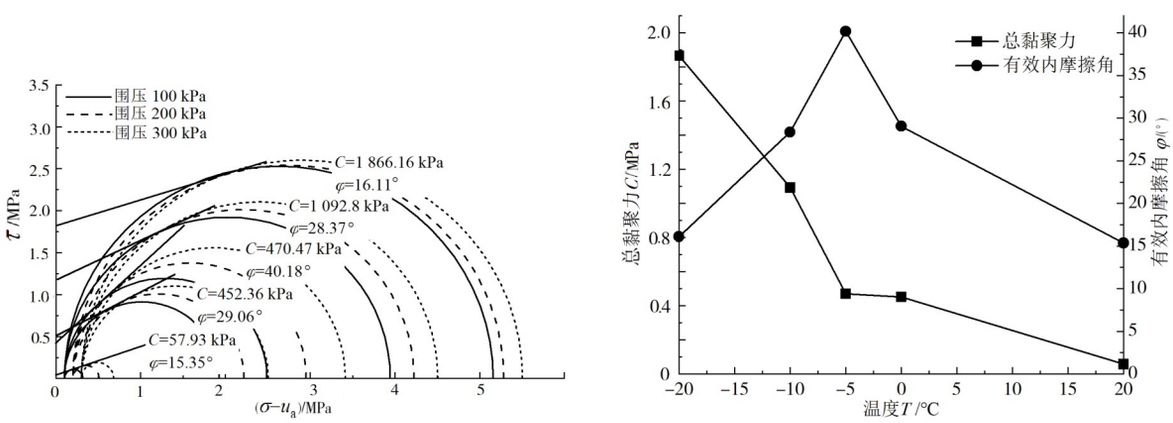
a　T=20 ℃　　b　T=0 ℃

c　T=−5 ℃　　d　T=−10 ℃

e　T=−20 ℃

图6　饱和全风化泥岩应力−应变曲线

Fig. 6　Stress-strain curve of complete-intense weathering mudstone



a　莫尔−库伦应力圆及强度包线　　b　总黏聚力、有效内摩擦角

图7　莫尔−库伦应力圆及强度包线和抗剪强度参数

Fig. 7　Mohr-Coulomb stress circle and shear strength parameters

表5　不同温度下非饱和全风化泥岩三轴试验结果
Table 5　Triaxial test results of unsaturated complete-intense weathering mudstone

岩样编号	基质吸力/kPa	温度/℃	净围压/kPa	偏应力/kPa	总黏聚力 C/kPa	有效内摩擦角 φ/(°)
1-1-1	210	20	100	217. 8	57. 93	15. 35
1-1-2			200	309. 1		
1-1-3			300	360. 8		
1-2-1		0	100	1 828. 2	452. 36	29. 06
1-2-2			200	2 017. 8		
1-2-3			300	2 205. 9		
1-3-1		-5	100	2 389. 7	470. 47	40. 18
1-3-2			200	2 753. 4		
1-3-3			300	3 117. 0		
1-4-1		-10	100	3 845. 5	1 092. 8	28. 37
1-4-2			200	4 026. 6		
1-4-3			300	4 207. 7		
1-5-1		-20	100	5 058. 6	1 866. 16	16. 11
1-5-2			200	5 084. 5		
1-5-3			300	5 206. 6		

破坏时的轴压太小,故变化很小。

在同一围压下,温度越低,偏应力增长速率越快,说明饱和全风化泥岩抗剪强度对温度的变化较为敏感。当温度 T=20 ℃时,随着围压的递增,固结阶段的泥岩颗粒变得愈加紧密,泥岩的剪应力随围压的增加而增大;当温度降低到0 ℃以下时,饱和的全风化泥岩试样内部自由水开始冻结,泥岩颗粒之间的胶结状态由原来的泥岩-水联结逐渐转变为泥岩-冰联结,从而提高了泥岩的结构稳定性;当温度降低到-20 ℃时,泥岩-冰二元联结强度完全可以弥补岩体强度的损失。

4.2　饱和全风化泥岩抗剪强度分析

基质吸力为0时,饱和全风化泥岩的抗剪强度参数如表6所示,不同温度时的莫尔-库伦应力

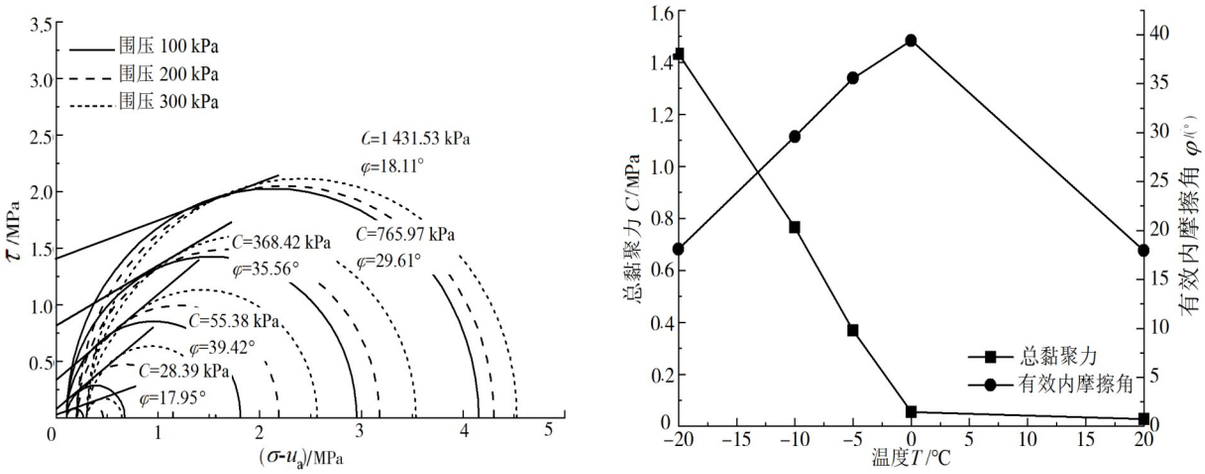
表6　饱和全风化泥岩三轴试验结果
Table 6　Triaxial test results of saturated complete-intense weathering mudstone

基质吸力/kPa	温度/℃	净围压/kPa	偏应力/kPa	总黏聚力 C/kPa	有效内摩擦角 φ/(°)
0	20	100	165. 5	28. 39	17. 95
		200	259. 6		
		300	343. 6		
	0	100	572. 8	55. 38	39. 42
		200	950. 6		
		300	1 267. 6		
	-5	100	1 710. 3	368. 42	35. 56
		200	1 988. 2		
		300	2 266. 1		
	-10	100	2 854. 0	765. 97	29. 61
		200	2 978. 6		
		300	3 237. 0		
	-20	100	4 053. 0	1 431. 53	18. 11
		200	4 103. 3		
		300	4 230. 7		

圆及强度包线如图8a所示,总黏聚力和有效内摩擦角随温度变化曲线如图8b所示。

不同温度下饱和与非饱和全风化泥岩抗剪强度参数变化对比如图9所示。由图9可知,不同温度条件下,天然含水率(基质吸力210 kPa)的非饱和全风化泥岩的总黏聚力均大于同一温度下的饱和全风化泥岩的总黏聚力;虽然二者在数值上存在差异,但变化趋势基本一致。

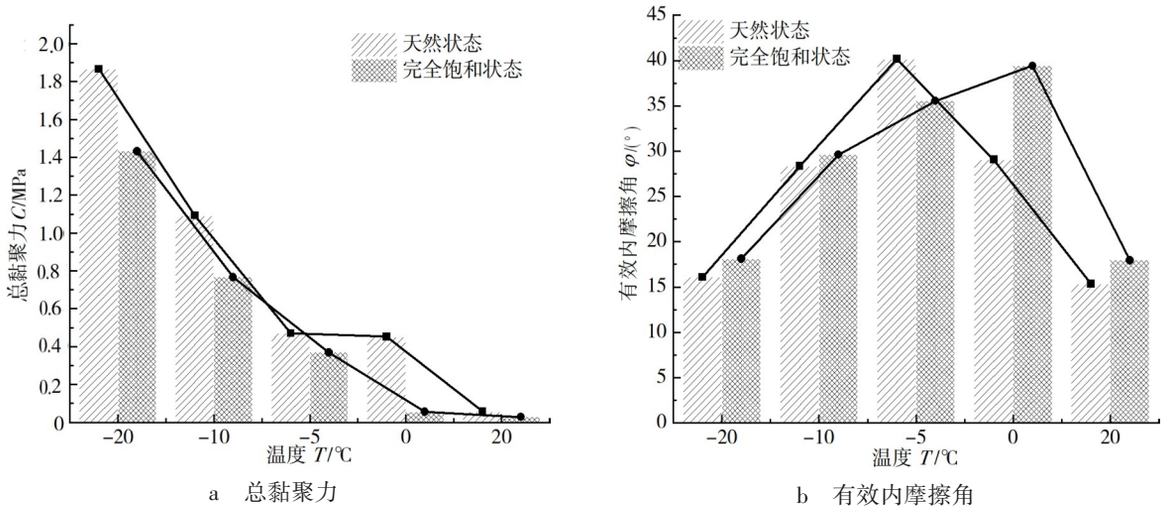
相对于非饱和全风化泥岩,饱和全风化泥岩的抗剪强度参数测试较为简便且结果更为保守,实际工程中可以通过测试饱和全风化泥岩的抗剪强度参数来预判非饱和全风化泥岩的基本性质。



a　莫尔-库伦应力圆及强度包线　　b　总黏聚力、有效内摩擦角

图8　莫尔-库伦应力圆及强度包线和抗剪强度参数

Fig. 8　Mohr-Coulomb stress circle and shear strength parameters



a　总黏聚力　　b　有效内摩擦角

图9　饱和与非饱和全风化泥岩抗剪强度参数

Fig. 9　Comparison of shear strength parameters

5　结论

基于室内土工试验、压力板试验与三轴剪切试验对全风化泥岩土水特征、天然含水率状态以及饱和状态下的全风化泥岩的强度和变形特征进行研究分析,得出以下结论:

1)全风化泥岩黏粒的平均含量为28.63%,粉粒平均含量为62.78%,砂粒平均含量为8.29%,粉粒、黏粒百分含量相对较高,砂粒较少,具有透水性弱、毛细现象显著的特点,非饱和状态下的全风化泥岩受负温作用时水分迁移速度快,距离远,温度对非饱和土的强度、变形等性质

影响较大。

2）天然含水率为19.15%的全风化泥岩具有210 kPa的基质吸力。当基质吸力小于210 kPa时，可认定全风化泥岩处于临界饱和状态。当基质吸力超过210 kPa时，体积含水率迅速下降，泥岩内部排出大量的重力水，并且基质吸力的增加还使得土颗粒间的毛细作用增强。

3）同一温度下应力-应变曲线变化趋势基本一致，整体呈正相关特点。在剪切初期，偏应力（$\sigma_1-\sigma_3$）增长速率较快；当应变增长至2%~4%时，偏应力增长速率开始减缓，但仍保持递增趋势。同一温度，试样承受的剪应力随着围压的增大而增大。当温度从0 ℃下降至-20 ℃时，围压对岩样的影响力逐渐减弱，固体颗粒之间由原来的水胶联结趋于冰胶结联结，联结形式的改变提高了结构的稳定性，因此全风化泥岩在剪切时具有应变硬化的性质。

4）泥岩颗粒间的有效黏聚力、基质吸力产生的表观黏聚力以及水冰相变产生的冰胶结黏聚力共同作用形成了总黏聚力。同一基质吸力下，总黏聚力随温度的降低逐渐增大。基质吸力作用时的吸力摩擦角、颗粒间的滑动摩擦角以及紧密排列的颗粒之间的镶嵌咬合的静摩擦角共同组成非饱和全风化泥岩的有效内摩擦角。正温时，随着温度的降低，有效摩擦角增大。负温时，温度越低，有效内摩擦角越小。

5）不同温度条件下，非饱和全风化泥岩的黏聚力均大于同一温度下的饱和全风化泥岩的黏聚力，二者仅在数值上存在差异，变化趋势基本一致。相对非饱和全风化泥岩而言，对饱和全风化泥岩的抗剪强度参数测试较为简便和保守，实际工程中可以通过测试饱和全风化泥岩的抗剪强度参数来预判非饱和全风化泥岩的基本性质。

参考文献：

[1] 叶云雪，易博文，刘小文，等. 脱湿路径下土体水分变化路径及体积变形对滤纸法测定土-水特征曲线的影响[J]. 岩土力学，2024，45(8)：2351-2361.

[2] 冯学茂，谢治，陈成华，等. 考虑双孔结构影响的压实红黏土持水特性及数学模型研究[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(6)：2305-2316.

[3] 刘光彬，韩琳琳，邵羽. 考虑初始孔隙率的非饱和土土-水特征曲线模型[J]. 公路工程，2024，49(4)：144-148，154.

[4] 林群仙，林东明，金泉兴. 非饱和土试验及强度预测研究[J]. 科技通报，2022，38(11)：67-70.

[5] ALVES R D，GITIRANA JR G D F N，VANAPALLI S K. Advances in the modeling of the soil-water characteristic curve using pore-scale analysis[J]. Computers and Geotechnics，2020，127：103766.

[6] PHAM H Q，FREDLUND D G，BARBOUR S L. A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves[J]. Canadian Geotechnical Journal，2005，42(6)：1548-1568.

[7] VOGEL T，VAN GENUCHTEN M T，CISLEROVA M. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions[J]. Advances in Water Resources，2000，24(2)：133-144.

[8] WAYLLACE A，LU N. A transient water release and imbibitions method for rapidly measuring wetting and drying soil water retention and hydraulic conductivity functions[J]. Geotechnical Testing Journal，2012，35(1)：103-117.

[9] NIU G，SUN D A，SHAO L T，et al. The water retention behaviours and pore size distributions of undisturbed and remoulded complete-intense weathering mudstone[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering，2021，25(7)：1233-1250.

[10] NIU G，SHAO L T，SUN D A，et al. Evolution law of pore-size distribution in soil-water retention test[J]. Rock and Soil Mechanics，2020，41(4)：1195-1202.

[11] MA Q Y，MA D D，YAO Z M. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic compressive strength and energy distribution of soft rock specimen[J]. Cold Regions Science and Technology，2018，153：10-17.

[12] ZENG Z X，KONG L W，WANG M，et al. Effects of remoulding and wetting-drying-freezing-thawing cycles on the pore structures of Yanji mudstones[J]. Cold Regions Science and Technology，2020，174：103037.

[13] 陆翔，周伟，才庆祥，等. 冻融循环下泥岩力学特性及细观破裂机理研究[J]. 采矿与安全工程学报，2021，38(4)：819-829.

[14] 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.

[15] WEN B P, HE L. Influence of lixiviation by irrigation water on residual shear strength of weathered red mudstone in Northwest China: Implication for its role in landslides′ reactivation[J]. Engineering Geology, 2012, 151: 56-63.
[16] KONG L W, ZENG Z X, BAI W, et al. Engineering geological properties of weathered swelling mudstones and their effects on the landslides occurrence in the Yanji section of the Jilin-Hunchun high-speed railway[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(4): 1491-1503.
[17] ZHANG S, XU Q, HU Z M. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China [J]. Engineering Geology, 2016, 204: 1-13.
[18] 万玲, 彭向和, 杨春和, 等. 泥岩蠕变行为的实验研究及其描述[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 924-928.
[19] 吴礼舟, 李部, 孙萍. 甘肃甘谷裂隙泥岩剪切蠕变行为及其修正模型研究[J]. 地质力学学报, 2017, 23(6): 923-934.
[20] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 甘肃天水泥岩剪切蠕变行为及其模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3603-3617.

Experimental Study on SWCC and Strength Characteristics of Unsaturated Fully Weathered Mudstone

ZHOU Runjian[1], HU Feng[2], WANG Zhe[3]

(1. Huzhou Huwan Expressway Co. Ltd., Huzhou Zhejiang 313000, China;
2. Zhejiang Hangchang Expressway Co. Ltd., Huzhou Zhejiang 313000, China;
3. School of Geometrics and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun Jilin 130118, China)

Abstract: In order to study the soil-water characteristics and shear strength of unsaturated fully weathered mudstone, the soil-water characteristics test was carried out by pressure plate instrument. Unsaturated (saturated) triaxial shear tests were performed based on soil-water characteristic test results. The results show that the unsaturated fully weathered mudstone in the natural state has the characteristics of weak water permeability and significant capillary phenomenon. The fully weathered mudstone with a natural water content of 19.15% has a matrix suction of 210 kPa. Under the same matric suction, the total cohesion increases with the decrease of temperature. When the temperature is positive, the effective friction angle increases with the decrease of temperature. When the temperature is negative, the lower the temperature, the smaller the effective internal friction angle.

Keywords: complete-intense weathering mudstone; soil-water characteristic test; triaxial shear test; matrix suction; shear strength

(责任编辑:邵 茗)