

doi: 10.11988/ckyyb.20190540

2020, 37(10): 82-88, 95

冰水沉积粉质黏土非饱和强度特征与细观机理研究

冯文凯, 白慧林, 孟睿, 李坤, 欧文

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 为弥补当前对非饱和粉质黏土细观结构研究的欠缺, 基于 Fredlund 双应力变量理论、Fredlund-Xing 土-水特征模型, 通过室内试验从细观结构、矿物成分至非饱和力学特性方面展开对冰水沉积粉质黏土的系统研究, 查明非饱和抗剪强度及参数变化特征, 深入分析细观作用机理。研究表明: 冰水沉积粉质黏土非饱和抗剪强度随基质吸力增大而提高, 增长速率逐渐降低, 内摩擦角 φ' 与含水率构成对数函数关系, 内聚力 c_{total} 具有峰值特征, 峰值点含水率约为 10.24%。土中的矿物组分遇水发生的水解、离子置换等作用对土体结构造成较大影响, 在低基质吸力条件下造成宏观非饱和抗剪强度的损伤, 根据其作用特征将非饱和抗剪强度随基质吸力的变化过程划分为 3 个阶段, 建立了适用于冰水沉积粉质黏土的三维破坏包络面的概化模型。与此同时, 分析发现材料参数 φ^b 在低基质吸力段并不为常数, 以某一初始值逐渐减小, 变化曲线呈反“S”形, 最终无限趋近于 0。

关键词: 冰水沉积粉质黏土; 土-水特征曲线; 非饱和抗剪强度; 细观结构; 矿物成分

中图分类号: TU42

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2020)10-0082-07

Unsaturated Strength Characteristics and Mesomechanism of Silty Clay Deposited in Ice Water

FENG Wen-kai, BAI Hui-lin, MENG Rui, LI Kun, OU Wen

(State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The mesostructure, mineral composition, and unsaturated mechanic properties of silty clay deposited in ice-water are investigated through laboratory test based on Fredlund's double-stress variable theory and Fredlund-Xing's soil-water characteristic model. The characteristics of unsaturated shear strength and parameter change are identified, and the mesomechanism of unsaturated shear strength varying with matric suction is revealed. Results demonstrate that the unsaturated shear strength of silty clay deposited in ice-water increases with the augment of matric suction; but the growth rate attenuates gradually. Internal friction angle φ' is in a logarithmic function relation with water content; while cohesion c_{total} is of peak characteristic, with the water content reaching about 10.24% at peak cohesion. Hydrolysis and ion exchange of mineral components in soil encountered with water have great influence on soil structure and result in the damage of macro-unsaturated shear strength under low matric suction. The process of variation of unsaturated shear strength with matric suction is divided into three stages, and meanwhile a generalized three-dimensional failure envelope model of silty clay deposited in ice-water is established. In addition, the material parameter φ^b is not a constant in the segment of low matric suction, but rather declines gradually from an initial value to be approaching zero infinitely, with the change curve in an inversed "S" shape.

Key words: ice-water deposited silty clay; soil-water characteristic curve; unsaturated shear strength; mesostructure; mineral composition

收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572291); 四川省青年科技创新研究团队专项计划项目(2017TD0018); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室团队项目(SKLG2016Z001)

作者简介: 冯文凯(1974-), 男, 四川成都人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土体斜坡稳定性及灾害控制、强震区震裂斜坡地质灾害成因与防治等方面的教学与研究。E-mail: fengwenkai@cdut.cn

通信作者: 白慧林(1992-), 男, 四川绵阳人, 博士研究生, 主要从事地质工程及地质灾害等方面的研究。E-mail: 553884932@qq.com

1 研究背景

第四纪更新世时期,岷江上游高山、极高山区经历多次冰期、间冰期的更替,间冰期末期冰川融水量减少,携带搬运能力减弱,形成细粒粉质黏土层、薄层、中厚层状构造,与丰水期堆积的角砾土、块碎石土呈层状交替分布^[1-2]。研究区为干暖河谷气候^[3],降雨量少,土体干燥,加之大型工程活动的频繁开展,导致粉质黏土层引起的边坡、地基沉降等问题日渐突出,因此对规模相对较小的粉质黏土层的深入研究具有重要意义。

当前,国内外学者对非饱和粉质黏土已进行了一定程度的研究,基质吸力($u_a - u_w$)对抗剪强度的贡献得到广泛认可^[4-5]。Escario^[6]较早采用直剪试验进行非饱和黏土强度测试,明确了直剪试验手段在研究中的可行性,并认为内摩擦角 φ' 与基质吸力无关;Fredlund和Rahardjo^[7]在进一步研究中引入材料变量 φ^b ,发现在通常情况下 $\varphi^b \leq \varphi'$ 。林鸿州等^[8]在对非饱和黏性土、无黏性土的研究中,发现2类土均存在峰值内聚力,但内聚力随饱和度变化幅度有所差异,峰值点对应的含水率介于13%~17%,并认为在低基质吸力条件下 φ^b 为常数,随着基质吸力增大将趋于0。黄琨等^[9]发现非饱和原状土的内聚力随含水率的变化存在峰值,对应含水率为12%,而重塑土则表现为渐进衰减,无峰值点。对于非饱和土细观结构,孙红等^[10]通过CT实时试验将结构变形分为4个阶段,阐明粉质黏土破坏的形成机理。Li等^[11]认为黏土内部孔隙具有双孔隙特征,且其分布受含水率、压实度影响。李龙起等^[12]研究发现矿物赋存状态、微观结构的变化是土体物理力学性质变化的重要因素。付宏渊等^[13]在研究综述分析中指出当前非饱和土研究对细观结构的重视不够,缺少土-水相互作用对宏观力学强度影响的分析。当前研究主要集中于宏观力学性质,而在细观结构的研究中又缺乏力学试验作为支撑,有关细观结构至宏观力学性质的系统分析不足,对结构、成分变化对非饱和力学强度影响的反映仍有所欠缺。

本文通过对岷江上游干暖河谷区冰水堆积体进行详细调查,选取理县桃坪镇堆积体中部粉质黏土为研究对象,采用直剪试验、土-水特征曲线测试等手段,研究抗剪强度与基质吸力的关系特征,深入分析非饱和强度参数、基质吸力、含水率(或饱和度)之间的相关性,结合电镜扫描、矿物检测等细观分

析,解释非饱和强度随基质吸力变化的机理,研究成果对当地工程建设、地质灾害防治等具有指导价值。

2 试验方案

2.1 基本物性指标

理县桃坪镇佳山村冰水堆积体位于1492~2127 m高程段,试验所取粉质黏土高程为1927 m,呈黄褐色、浅黄色,干燥,手捏易碎,纯净、无角砾杂质,表部裂纹发育密集,见图1。天然密度为1.76~1.83 g/cm³,天然含水率为5.91%,饱和含水率为32.4%,相对密度2.70,塑限19.38%,液限31.44%,塑性指数13.37,液性指数-1.01。通过筛分试验可知,最大粒径介于0.5~1 mm,≥0.075 mm的颗粒总体积占比为24.36%,<0.075 mm的颗粒经激光粒度分析(见图2)粒径主要集中于10~70 μm段,约占总体积的63%。



图1 粉质黏土特征

Fig.1 Characteristics of silty clay

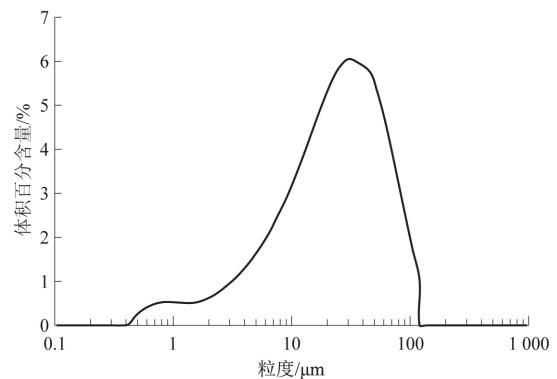


图2 <0.075 mm 粒组激光粒度分析结果

Fig.2 Results of laser particle size analysis of <0.075 mm granule group

2.2 土-水特征试验

试验采用实验室1 bar 体积压力板仪(见图3),试验步骤为:①陶土板、仪器管路饱和→②原状试样饱和→③装样、仪器调试→④脱湿测试→⑤吸湿测

试→⑥试验结束、仪器清理。脱湿开始阶段,初始孔隙气压为 0,依次按 2、4、8、16、32、64 kPa 加压;吸湿阶段,孔隙气压按脱湿孔隙气压梯度逆序降低,每一阶段记录、计算不同孔隙气压下排水量,得出体积含水率,从而可绘制出土-水特征曲线(SWCC)。



图3 体积压力板仪

Fig.3 Volume pressure plate

2.3 直剪试验

试验采用四联等应变直剪仪,试样取原状样,制成环刀样后进行烘干,干密度为 1.58 g/cm³,然后采用滴定法进行含水率配制,共 6 个梯度,分别为 5.9%(天然状态)、13.3%、17.6%、21.2%、27.1%、34.3%(饱和状态)。含水率 13%是大部分学者试验研究所得内聚力峰值点对应的含水率值,本文设置一组特定含水率梯度,对前人研究成果进一步验证。试验过程采用快剪方法,垂向荷载分别为 50、100、150、200 kPa,剪切速率为 0.8 mm/min。

2.4 电镜扫描与水化学测试

取适量原状样,做干燥、浸水处理,置于扫描电镜(SEM)(S-3000N/H)获取土体不同条件下微观结构特征,如孔隙特征、颗粒及其排列分布特征,放大倍数设置 200 和 1 000 两个梯度。与此同时,按 1:5 的土水质量比配制并静置处理,在不同时间节点取水溶液,采用离子色谱(IC)及电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)检测离子浓度^[2]。

3 土-水特征与微观结构分析

3.1 土-水特征试验结果

图 4 为脱湿、吸湿过程土-水特征曲线,脱湿、吸湿曲线具有明显的滞回特征。脱湿过程曲线表现出典型的三阶段特征,呈反“S”形,边界效应区内饱和度微弱降低,基质吸力不断增大,至过渡区,曲线陡降,饱和度与基质吸力的对数表现出近线性关系,达到残余饱和后过渡为残余区,此时曲线变化幅度

再次减缓。可测得非饱和冰水沉积粉质黏土进气值为 3.4 kPa,该值偏小可能与土体化学性质有关,残余含水率为 4.9%~5.2%。吸湿过程曲线与脱湿过程具有相似的变化特征,在低饱和度时,2 条曲线有重合趋势,随着吸湿饱和度提高,曲线斜率增大,但缓于脱湿过程曲线过渡段,之后饱和度与基质吸力对数仍以近线性关系变化,最终饱和度仅达到 83.2%,与脱湿过程曲线差异明显。

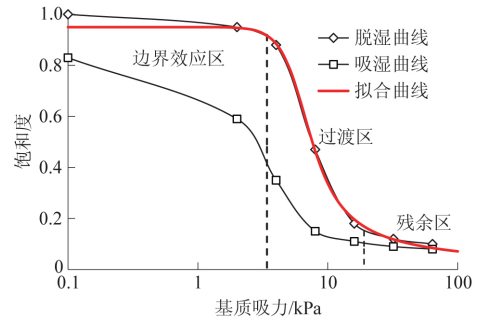


图4 粉质黏土土-水特征曲线

Fig.4 Soil-water characteristic curve of silty clay

土-水特征曲线模型伴随非饱和土理论而发展,现有数学模型中总体可分为 4 类^[14],即:基于对数函数的幂函数模型、幂函数模型、对数函数模型、分形模型。本文采用 Fredlund 和 Xing^[15]根据孔径分布提出的 Fredlund-Xing 模型(简称 F-X 模型)。

F-X 模型方程为:

$$\theta = C(\psi) \theta_s \left\{ \frac{1}{\ln [e + (\psi/a)^n]} \right\}^m, \quad (1)$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)}. \quad (2)$$

式中:θ 为体积含水率;ψ 为吸力,可近似以基质吸力表示;a、m、n 为拟合参数;e 为自然对数,常量;θ_s为饱和体积含水率;ψ_r为出现残余含水率时的吸力;C(ψ)为修正因子,Leong 等^[16]在对前人研究成果综述的基础上,给出 C(ψ) 建议值,本文根据建议值采用 0.95。

通过 MatLab 拟合,模型参数及相关拟合系数见表 1,拟合曲线相关特征见图 4。确定系数 R² 高达 0.996 9,拟合效果理想,F-X 模型能有效描述非饱和和粉质黏土土-水特征曲线变化规律,反映出 F-X 模型对该区域冰水沉积粉质黏土的研究具有较好的适用性。

表 1 F-X 模型拟合结果

Table 1 Fitting results of F-X model

F-X 模型参数			和方差	确定系数	调整确定系数	标准差
a	m	n				
5.642	1.006	4.576	0.0031	0.9969	0.9954	0.0281

3.2 细观结构分析

非饱和土基质吸力的增长或消减是土体内孔隙水含量变化的反映,土体内部孔隙大小、连通性、分布形态等特征无明显规律性,在不考虑其它因素的前提下,从孔隙几何形态解释滞回现象是合理的。若土体矿物成分中含有易溶矿物,或矿物遇水发生化学反应,如置换作用,则饱水时间增长,该类矿物组分含量的减少将引起土体内孔隙几何特征的变化,脱湿、吸湿过程中出现的“瓶颈效应”将加强。

冰水沉积粉质黏土矿物成分主要为伊利石、绿泥石、石英、斜长石、方解石和石膏^[2]。粉晶 X 射线衍射检测出饱水前、后矿物含量差异变化明显(图 5),伊利石、石膏含量不同程度下降,其余矿物含量则相对增长。浸水溶液离子检测结果(表 2)显示:随着浸水时间增长,阴阳离子浓度增长最为明显的分别为 Ca²⁺、Mg²⁺、Na²⁺ 以及 SO₄²⁻,并且增长速率均表现出先大后小的特征,1.5 d 后离子浓度趋于稳定,3 d 后 SO₄²⁻ 浓度值涨幅达 127.41 mg/L, Ca²⁺ 浓度值稳定于 296.2 mg/L,涨幅达 243.3 mg/L, Mg²⁺、Na²⁺ 涨幅较为接近。石膏(CaSO₄·2H₂O)属于中等易溶矿物,遇水后矿物内部结合水先发生分离,然后 CaSO₄ 在水的作用下再次分解为 Ca²⁺、SO₄²⁻,根据其余矿物化学组成特征,可判定 Ca²⁺、SO₄²⁻ 来源于石膏的水解作用; Mg²⁺、Na²⁺ 源于离子交换作用。通过上述分析可知,水解作用、离子交换作用将导致矿物组分中部分矿物含量变化。

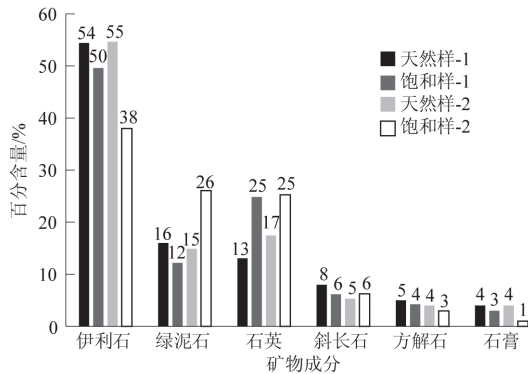


Fig.5 Test result of mineral composition

天然、饱水样电镜扫描细观结构特征见图 6。粉质黏土土颗粒呈片状、粒状,天然状态呈絮凝结构^[17-18],颗粒间边-面、边-边、面-面接触产生结构孔隙,石膏类矿物以“粘结剂”形式贯穿整体土体结构点,提高结构强度,增强颗粒骨架稳定性。石膏在长期自重固结作用下构成原骨架的支撑结构,饱水后,土体中石膏逐步水解,造成其所处的结构连接点破坏,一方面石膏的水解直接引起该位置孔隙增大,另

一方面,失去支撑的其余土颗粒将发生“垮塌”,将导致以石膏点为中心形成破坏区。此外,伊利石等部分

表 2 粉质黏土浸水溶液矿物离子检测结果

Table 2 Test results of mineral ions in aqueous solution of silty clay

离子名称	不同浸泡时间下离子浓度/(mg·L ⁻¹)				涨幅/(mg·L ⁻¹)
	0 d	0.5 d	1.5 d	3.0 d	
CO ₃ ²⁻	0.050 0	0.050 0	0.050	0.050	—
HCO ₃ ⁻	1.050 0	1.150 0	1.050	1.080	0.030 0
Cl ⁻	14.140 0	14.090 0	30.450	34.280	20.150 0
NO ₃ ⁻	2.671 0	1.903 0	2.580	3.080	0.410 0
SO ₄ ²⁻	601.490 0	625.830 0	689.500	728.900	127.410 0
Na ⁺	22.330 0	94.640 0	117.900	114.800	92.470 0
K ⁺	3.046 0	7.652 0	7.494	7.162	4.120 0
Ca ²⁺	52.900 0	248.900 0	295.000	296.200	243.300 0
Mg ²⁺	17.970 0	114.500 0	135.900	138.800	120.830 0
Al ³⁺	0.095 0	0.109 0	0.117	0.121	0.026 0
Fe ³⁺	0.000 2	0.000 4	0.008	0.005	0.004 8
pH 值	8.120 0	8.100 0	8.050	—	-0.070 0

矿物在水的作用下发生离子置换,矿物晶体结构内正负电荷失去平衡,使矿物活性程度发生变化,物理化学性质遭受一定程度影响,反映在细观结构上则表现为土体结构骨架的弱化。对比天然、饱水样扫描结构可以发现,饱水后土体内孔隙扩大 2~3 倍,孔隙数量增多,颗粒间分布较分散,接触形式凌乱,出现“凹腔”型孔隙,由此可见结构支柱的损伤或消失对结构造成的影响。

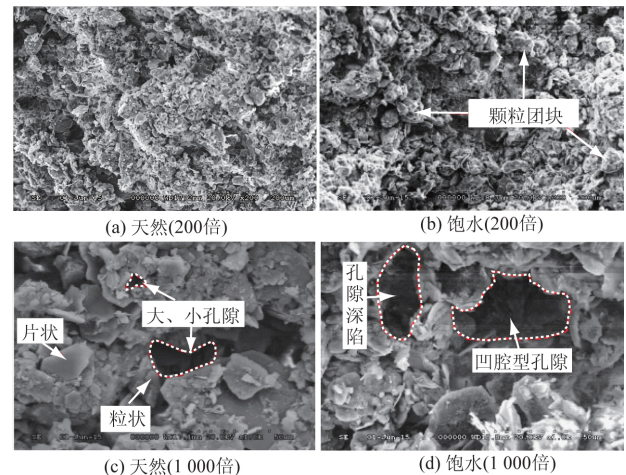


图 6 粉质黏土细观结构电镜扫描图像

Fig.6 Microstructure scanning images of silty clay

饱水过程中孔隙增大、增多,土体内部沿不连续孔隙节点形成小团块,从而构成团块内孔隙与团块间孔隙的双孔径分布特征^[19]。Li 等^[11]将黏土先饱水再干燥,类似于土-水特征试验中的脱湿过程,更能清晰看出干燥后孔隙受孔隙水影响的程度(图 7),但其未说明矿物成分对孔隙变化是否构成影响。

通过上述分析可以解释土-水特征曲线不同阶

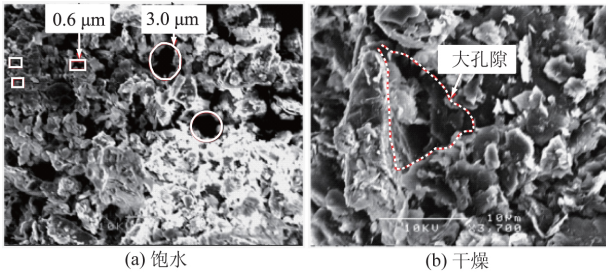


图7 黏性土微观结构电镜扫描图像^[11]

Fig.7 Microstructure scanning images of clay^[11]

段差异的原因。脱湿过程初期,粉质黏土中伊利石、石膏等矿物成分遇水逐渐发生置换作用、水解作用,作用过程较缓,至脱湿过程结束基本到达稳定,与离子浓度峰值对应,此时土体结构已经受到极大程度的损伤。进入吸湿过程后,土体结构已经形成上述分析所知的双孔径分布特征,孔隙水的进入严重受大孔隙的影响,孔隙几何特征引起的“瓶颈效应”更加突出,从而形成典型的滞回曲线形态,试样的最终饱和也远未达到全饱和状态。同时对比结果可以看出,对该区域粉质黏土进行非饱和特征研究采用脱湿曲线更为合理。

4 非饱和抗剪强度分析

4.1 Fredlund 双应力变量理论

由于 Bishop 基于摩尔-库伦准则提出的有效应力强度理论存在不足之处, Fredlund 等^[7]将 $(\sigma - u_a)$ 、 $(u_a - u_w)$ 视为独立变量,建立双应力变量强度理论(式(3)),剪应力 τ 、法向应力 $(\sigma - u_a)$ 、基质吸力 $(u_a - u_w)$ 构成三维应力空间(见图8)。

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (3)$$

式中: τ 为非饱和土抗剪强度; σ 为试验条件正应力; u_a 为土体内孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; $(u_a - u_w)$ 为非饱和土体基质吸力; c' 为饱和状态下有效内聚力; φ' 为有效内摩擦角; 引入材料参数 $\varphi^b, \tan \varphi^b$

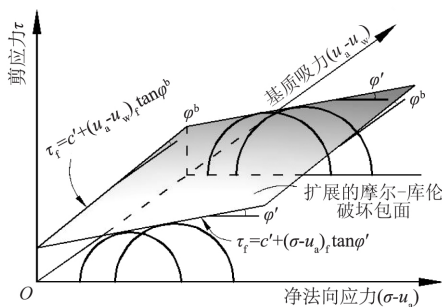


图8 非饱和土的扩展摩尔-库伦破坏包面

Fig.8 Extended Mohr-Coulomb failure cover of unsaturated soil

基于式(3)定义2种内聚力 c_{total1} 和 c_{total2} , 分别表示如下:

$$c_{total1} = c' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (4)$$

$$c_{total2} = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' \quad (5)$$

则式(3)可表示为:

$$\tau = (\sigma - u_a) \tan \varphi' + c_{total1} \quad (6)$$

$$\tau = (u_a - u_w) \tan \varphi^b + c_{total2} \quad (7)$$

根据 Fredlund 双应力变量强度理论,将式(3)改写为2种不同形式,分别表示基质吸力和法向正应力对非饱和抗剪强度的作用特征,便于分析和理解。

4.2 非饱和抗剪强度特征

根据直剪试验结果,低饱和度条件下存在峰值点,以峰值强度作为非饱和抗剪强度,高饱和度条件下以10%应变对应强度作为非饱和抗剪强度,并通过式(6)可求得有效内摩擦角 φ' 和内聚力 c_{total1} , 计算结果见表3, φ' 和 c_{total1} 随含水率的变化特征见图9。

表3 不同含水率粉质黏土抗剪强度及非饱和强度指标

Table 3 Shear strength and unsaturated strength index of silty clay with different water content

含水率/ %	不同垂向荷载下抗剪强度/kPa				内摩 擦角 $\varphi' / (^\circ)$	内聚力 $c_{total1} /$ kPa	基质 吸力/ kPa
	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa			
5.9(天然)	92.5	134.5	162.4	204.6	36.09	57.45	19.84
13.3	86.8	119.5	140.5	169.5	28.54	60.45	6.14
17.6	81.4	104.6	126.8	151.2	24.87	58.10	4.49
21.2	75.8	97.5	118.5	145.2	24.64	51.95	3.59
27.0	56.5	79.4	99.6	123.4	23.85	34.50	1.60
35.0(饱和)	36.2	59.4	81.6	96.5	22.12	16.10	0.00

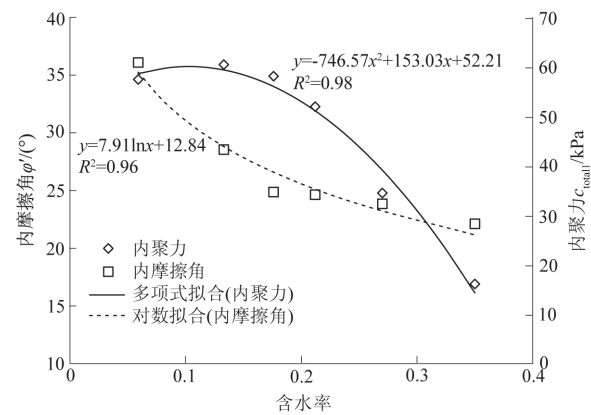


图9 强度参数随含水率变化趋势

Fig.9 Trend of strength parameters varying with water content

由表3、图9可以看出,随着含水率的降低,基质吸力逐渐增大,不同法向应力下试样抗剪强度均呈现增长趋势,有效内摩擦角 φ' 随含水率增大而呈非线性降低,具有对数函数关系特征, c_{total1} 随含水率提高出现短暂提高,而后快速降低,通过拟合函数求得峰值点对应含水率值为10.24%,其峰值特征与林鸿州等^[8]、许四法等^[5]所得结果一致,但峰值点对

应的含水率值略小于前人研究所得的 13%。由此可见,对于不同地区的粉质黏土,非饱和强度特征具有一定共性,但由于成因、固结历史以及矿物组分等因素影响,存在量值的差异。

进一步分析可知,式(7)在形式上可表示非饱和土剪应力 τ 与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 的线性关系,而实际上基质吸力的增减伴随着含水率的变化,有效内摩擦角 φ 的非线性变化导致内聚力 c_{total2} 将随基质吸力的变动而变化,故由该式建立的 $\tau - (u_a - u_w)$ 曲线也将呈现非线性特征。试验得出 $\tau - (u_a - u_w)$ 关系曲线见图 10,抗剪强度 τ 增长速率随基质吸力增大而逐渐减小,最终曲线趋于平缓,形成类似于应变硬化的特征,反映出基质吸力对非饱和土抗剪强度的贡献度具有上限值^[8],基质吸力对非饱和强度的影响并非无止境。曲线切线的交点对应某一基质吸力点的非饱和抗剪强度,切线在纵轴的截距为相对应的内聚力 c_{total2} ,斜率为 $\tan \varphi^b$,由基质吸力作用构成的摩擦角 φ^b 将随基质吸力的变化而变化。

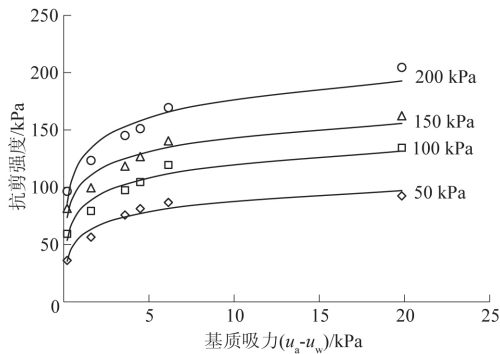


图 10 抗剪强度与基质吸力关系曲线

Fig.10 Curves of shear strength versus matric suction

通过式(4)可得出不同基质吸力(含水率)条件下的 φ^b 值随基质吸力变化特征,见图 11。本文所得 φ^b 高于 φ' ,与林鸿州等^[8]所得结果相似,与 Fredlund 研究结论有所差异,这与试样材料、试验条件的不同有关系。 φ^b 初始值较大,在低基质吸力条件下随基质吸力增大而出现缓慢降低,当基质吸力增大时 φ^b 降低速率提高,这与图 10 中所反映的趋势相符合。Fredlund 与 Gan 等^[20-21]、林鸿州等^[8]认为在低基质吸力条件下 φ^b 为定值,并随着基质吸力增大而减小,Fredlund 认为 φ^b 减小至一定程度将保持不变,而林鸿州分析 φ^b 值将趋于 0。由于基质吸力随含水率降

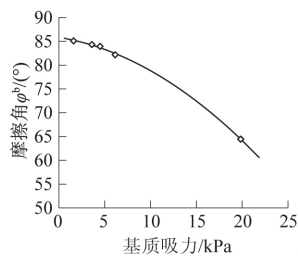


图 11 φ^b 与基质吸力关系曲线

Fig.11 Curve of φ^b versus matric suction

低而增大,基质吸力对抗剪强度的贡献不会无限提高,其影响必将在一定限值范围内,故当基质吸力增大, φ^b 一直保持为常值理论上不合理,为保持关系式的平衡必将逐渐降低。非饱和土作为三相介质,在非饱和土定义范围内,孔隙水含量一直降低但不为 0(否则为干土,无基质吸力),孔隙水含量的减少引起基质吸力的增加, φ^b 值将逐渐减小,并趋近于 0 但不为 0,否则非饱和抗剪强度中无基质吸力的影响。

4.3 细观作用机理分析

综合前述分析可知,冰水沉积粉质黏土中部分矿物成分遇水发生水解和置换作用,加之孔隙水的浸泡软化,导致土体结构逐渐弱化损伤,孔隙含量增多、直径增大,孔隙水的收缩使基质吸力出现一定程度降低。法向正应力下的摩擦强度 $(\sigma - u_a) \tan \varphi'$ 受剪切面土体结构的影响,而孔隙含量、直径的变化,以及结构的弱化、软化使剪切面附近颗粒间的接触状态、相互作用形式发生改变,可理解为剪切面摩擦系数的降低,最终反映在有效内摩擦角 φ' 的变化趋势表现为非线性特征。随含水率提高, φ' 衰减速率为先大后小。由于内摩擦角随含水率发生变化,则 c_{total2} 同样随基质吸力而变化,不表现为定值,故在 $\tau - (u_a - u_w)$ 曲线上呈现出下凹型趋势特征,切线的斜率及截距随基质吸力动态变化。若土体的矿物组分不受孔隙水的影响,如砂土,土体结构未发生变化,则有效内摩擦角 φ' 基本保持不变,在低基质吸力段 $\tau - (u_a - u_w)$ 曲线为线性关系。

目前,大部分研究学者所得的 $\tau - (u_a - u_w)$ 曲线均为非线性,且与本文具有相似的变化趋势,其主要原因就是孔隙水对土体结构的影响分为物理作用、化学作用。物理作用主要为孔隙水的浸泡软化、溶解等,化学作用包括水解作用、置换作用等,综合引起土体结构强度、基质吸力的降低。本文根据试验数据,结合前人研究成果,将 $\tau - (u_a - u_w)$ 划分为 3 个阶段(如图 12),详述如下。

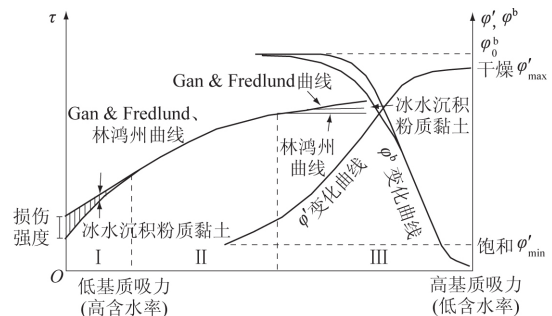


图 12 非饱和抗剪强度与基质吸力关系模型

Fig.12 Model of relationship between unsaturated

shear strength and matric suction

阶段I: 在低基质吸力段, 矿物组分不受孔隙水影响, 土体结构未发生变化, $\tau-(u_a-u_w)$ 曲线表现为线性特征; 反之, $\tau-(u_a-u_w)$ 曲线为下凹的非线性曲线, φ^b 以一定初始值开始逐渐减小。图 12 中阴影区表示 2 种情况下结构变化引起的强度损伤。

阶段II: 抗剪强度随基质吸力的提高而增大, 但增加速率逐渐减缓, φ^b 值逐渐降低, 此时非饱和土中的孔隙水对矿物组分的影响程度极大地减弱, 可忽略。

阶段III: 随着含水率进一步降低, 基质吸力趋于无限增大, 基质吸力对非饱和土抗剪强度的贡献接近上限值, 即干土的强度, φ^b 值降低趋于 0, 不可能保持常值, 也不会为 0。

图 12 中 $\tau-(u_a-u_w)$ 曲线与 τ 的交点为饱和土抗剪强度, 此时的 φ' 为饱和状态下的内摩擦角 φ'_{\min} , φ^b 具有一定初始值 φ^b_0 , 其值的大小取决于土体材料性质, 随含水率的变化趋势取决于非饱和土土体结构的水化学属性。当土体矿物组分、结构不受孔隙水影响, 则初始段 φ^b 为常值, 但最终受基质吸力影响程度的控制均将趋于 0。抗剪强度的界线值为干土强度, 曲线与之无限接近, 其对应干土内摩擦角为 φ'_{\max} 。故最终总结出冰水沉积粉质黏土的三维应力空间表现为一个曲面, 如图 13 所示。

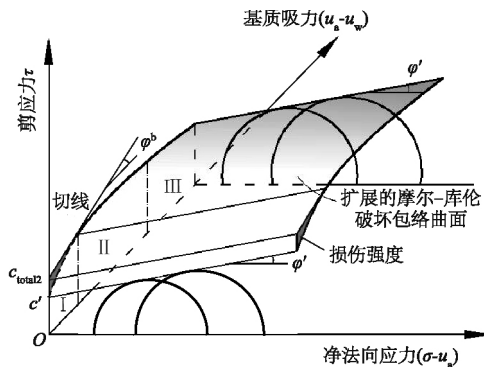


图 13 改进的摩尔-库伦破坏包络曲面

Fig.13 Improved Mohr-Coulomb failure envelope surface

5 结论

(1) 冰水沉积粉质黏土土-水特征曲线呈现典型的滞回特征, Fredlund-Xing 模型拟合分析结果具有很好的效果。矿物组分在孔隙水中发生的水解、离子置换等作用导致结构孔隙增大、增多, 孔隙几何特征的变化加剧脱湿、吸湿曲线的差异。

(2) 粉质黏土非饱和抗剪强度随含水率的降低而提高, 有效内摩擦角 φ' 与含水率构成对数函数关系, 内聚力 c'_{total1} 随含水率增大, 先具有短暂的提升,

而后快速降低, 峰值点含水率约为 10.24%, 略小于前人研究所得的 13%, 说明不同地域、不同成因的非饱和土既具有共性, 又存在差异。

(3) 粉质黏土非饱和抗剪强度增长速率随基质吸力增大逐渐降低, 关系曲线呈下凹特征, 低基质吸力条件下矿物组分的水解作用、离子置换作用等造成非饱和抗剪强度的损伤。根据矿物组分含量变化的影响, 将非饱和抗剪强度随基质吸力的变化过程划分为 3 个阶段, 建立了适用于冰水沉积粉质黏土的三维破坏包络面的概化模型。

(4) Fredlund 理论中材料参数 φ^b 以一定初始值逐渐减小, 初始值的大小取决于材料性质, 变幅取决于土体矿物组分的水化学属性。 φ^b 随基质吸力增大, 变化曲线呈反“S”形, 最终将无限趋近于 0。

参考文献:

- [1] 曹伯勋. 地貌学及第四纪地质学 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1995.
- [2] 黄家华. 四川理县桃坪冰水堆积体强度特性研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [3] 庞学勇, 包维楷, 吴宁. 岷江上游干旱河谷气候特征及成因 [J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(增刊 1): 46-53.
- [4] 祁昊, 冯文凯, 陈建峰, 等. 降雨作用下欢喜坡冰水堆积体角砾土强度特性 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 78-84.
- [5] 许四法, 王志健, 胡琦, 等. 重塑非饱和粉质黏土抗剪强度特性试验研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(2): 227-231.
- [6] ESCARIO V. Suction-controlled Penetration and Shear Tests [C] // Proceeding of the 4th International Conference on Expansive Soils. Denver, Colorado, June 16-18, 1980: 781-787.
- [7] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. New York: Wiley, 1993.
- [8] 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响 [J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1931-1936.
- [9] 黄琨, 万军伟, 陈刚, 等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2600-2604.
- [10] 孙红, 葛修润, 牛富俊, 等. 上海粉质黏土的三轴 CT 实时细观试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4559-4564.
- [11] LI X, ZHANG L M. Characterization of Dual-structure Pore-size Distribution of Soil. [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(2): 129-141.

(下转第 95 页)

- [16] HSÜ K J. Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 86(1): 129-140.
- [17] IVERSON R M. The Physics of Debris Flows [J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(3): 245-296.
- [18] IVERSON R M. Granular Avalanches across Irregular Three-dimensional Terrain: 2. Experimental Tests [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109 (F1): F01015.
- [19] 王玉峰, 许强, 程谦恭, 等. 复杂三维地形条件下滑坡-碎屑流运动与堆积特征物理模拟实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1776-1791.
- [20] 贺凯, 殷跃平, 冯振, 等. 重庆南川甑子岩-二垭岩危岩带特征及其稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 16-22.
- [21] 何潇. 长江巫峡望霞危岩形成机制与危险性评价 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [22] 段俐, 康琦, 申功. PIV 技术的粒子图像处理方
法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2000(1): 79-82.
- [23] 付在国, 赵飞宇, 张莉, 等. PIV 与 PLIF 同步测量方法在湍流扩散研究中的应用 [J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(1): 90-95.
- [24] 王品, 徐则民. 头寨大型高速远程滑坡碎屑流堆积体的粒度组成 [J]. 山地学报, 2013, 31(6): 745-752.
- [25] 赵晓彦, 胡厚田, 齐明柱. 云南头寨沟大型岩质高速滑坡碰撞模型试验 [J]. 自然灾害学报, 2003(3): 99-103.
- [26] 许启铿, 金立兵, 王录民, 等. 粮食力学参数的试验研究 [J]. 河南工业大学学报, 2010, 31(1): 18-21.
- [27] 蒋红英, 鲁进步, 慕青松. 颗粒材料结构自组织沉降微观研究 [J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(4): 556-560.
- [28] 孙开畅, 刘林锋, 明华军, 等. 不同粒径及级配对碎石料休止角影响的试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2016, 33(8): 91-95.

(编辑: 刘运飞)

(上接第 88 页)

- [12] 李龙起, 罗书学, 姜红, 等. 非饱和红黏土土水特性及强度特征研究 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(3): 393-398, 431.
- [13] 付宏渊, 马吉倩, 史振宁, 等. 非饱和土抗剪强度理论的关键问题与研究进展 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 1-14.
- [14] 戚国庆, 黄润秋. 土水特征曲线的通用数学模型研究 [J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 182-186.
- [15] FREDLUND D G, XING A. Equations for the Soil-Water Characteristic Curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [16] LEONG E C, RAHARDJO H. A Review on Soil Water Characteristic Curve Equations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123: 1106-1117.
- [17] 谭罗荣, 张梅英, 邵梧敏, 等. 灾害性膨胀土的微结构特征及其工程性质 [J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 48-57.
- [18] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红粘土的基本特性与微观结构模型 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 458-462.
- [19] 黄启迪, 蔡国庆, 赵成刚. 非饱和土干化过程微观结构演化规律研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 165-173.
- [20] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The Shear Strength of Unsaturated Soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15: 313-321.
- [21] GAN J K M, FREDLUND D G, RAHARDJO H. Determination of the Shear Strength Parameters of an Unsaturated Soil Using the Direct Shear Test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(3): 500-510.

(编辑: 陈敏)

本刊电子信箱: cjkb@163.net