

DOI: 10.11779/CJGE20220963

宽饱和度范围非饱和粗细混合土的强度演化规律： 试验现象

赵煜鑫¹, 张禄乾^{1,2}, 李旭^{*1}, 赵红芬^{3,4}

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142;

3. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 510301)

摘要: 粗细混合土是自然界和工程中普遍存在的土体类型, 其强度对边坡、基坑、挡土墙等岩土工程稳定性至关重要。然而粗细混合土的强度在宽饱和度范围内的演化规律不明, 尤其是缺少低饱和度时的试验数据和演化规律。为了阐明粗细混合土强度随饱和度变化的一般规律, 采用室内直剪试验研究了7种不同细粒含量的粗细混合土的强度与变形特性。试验结果表明: ①在宽饱和度范围内, 由于毛细作用和吸附作用对抗剪强度贡献不同, 非饱和粗细混合土的抗剪强度随饱和度的变化普遍存在“山峰效应”, 即在非饱和残余区内出现了强度极大值, 其强度随饱和度或吸力的演化规律可以划分为缓慢增长区、快速上升区和峰后下降区3个阶段。②当饱和度低于残余饱和度时, 非饱和土的剪切破坏还出现了典型的脆性破坏特征。③粗细混合土的强度变形特征与细粒含量密切相关, 随着细粒含量的增加, 土骨架由粗颗粒控制逐渐转变为细粒控制, 非饱和强度最大值所对应的细粒含量为50%~80%。

关键词: 非饱和土; 宽饱和度范围; 抗剪强度; 脆性破坏

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)11-2278-11

作者简介: 赵煜鑫 (1995—), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土力学方面的研究工作。E-mail: yuxinzhao@bjtu.edu.cn。

Unsaturated shear strength characteristics of coarse-fine mixed soils in a wide range of degree of saturation: experimental phenomena

ZHAO Yuxin¹, ZHANG Luqian^{1,2}, LI Xu¹, ZHAO Hongfen^{3,4}

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. The Third Survey and Design Institute of China Railway, Tianjin 300142, China; 3. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University,

Zhuhai 519082, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 510301, China)

Abstract: The coarse-fine mixed soils are widely distributed in natural and geotechnical engineering practices. Their strength is vital to the stability of geotechnical engineering (e.g., slopes, foundation pits and retaining walls). However, the unsaturated shear strength characteristics of the coarse-fine mixed soils are not evident in a wide range of degree of saturation (S_r), especially the lack of experimental data in the low range of S_r . In order to clarify the general rules that the unsaturated shear behaviors of the coarse-fine mixed soils in the full range of S_r , a series of direct shear tests are carried out on seven unsaturated coarse-fine mixed soils to study the unsaturated shear strength and deformation characteristics. The test results show that: (1) Based on the contribution of capillary water and adsorbed water to the unsaturated shear strength, the unsaturated shear strength exhibits a "peak behavior", where the shear strength reaches its peak at the residual zone, the shear strength characteristics with S_r or suction can be divided into three stages: slow growth zone, rapid rise zone and post-peak decline zone. (2) Brittle failure occurs when S_r is lower than the residual saturation. (3) The fines content (FC) significantly affects the strength and deformation characteristics of the coarse-fine mixed soils. As FC increases, the soil microstructure changes from a fines-controlled to a coarse-controlled structure. The FC corresponding to the maximum unsaturated strength is between 50%~80%.

Key words: unsaturated soil; wide range of degree of saturation; shear strength; brittle failure

0 引言

中国山区广泛发育和分布着松散堆积体, 松散堆

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979002, 52279121)

收稿日期: 2022-08-08

*通信作者 (E-mail: xuli@bjtu.edu.cn)

积体是由粗粒土、细粒土及孔隙构成的松散粗细混合土。其成分混杂、结构复杂、强度低、变形大和稳定性差。在中国东南沿海地区广泛分布的残积土同样也是一种由粗细混合料组成的特殊土。在自然条件下通常处于非饱和状态，其含水率和吸力随着干湿交替的大气环境不断变化。在持续降雨作用下，土中吸力的消失引起土体强度的降低，边坡易失稳从而发生滑坡，给社会经济建设和人民生命财产造成巨大的损失^[1]。

颗粒级配是粗细混合土的重要物理参数^[2-3]，直接影响到土体的细观结构特征，进而影响变形破坏机理及宏观力学特征。降雨入渗和蒸发、地下水位的上升和下降会改变土体中的水分分布和土体的应力状态。水分的赋存状态和运移是导致非饱和土强度和变形特性发生变化的主要原因，而粗细混合土中的细粒土对水分的变化更加敏感。因此，有必要开展不同颗粒级配的粗细混合土的非饱和力学试验，研究细粒含量对非饱和土强度和变形特性的影响。

非饱和土中土-水之间的相互作用可划分为毛细作用和吸附作用，这两部分的作用机制不同，对土体宏观力学性质的影响也不同^[4]。毛细作用主要存在于土体孔隙中形成的水-气弯液面。吸附作用主要是指土体中固-液相间的双电层作用力、范德华作用力和其他水合作用，表现为结合水。在降雨或相对湿度较高的环境中，土体的饱和度较高，毛细作用占主导地位。但在干旱或半干旱地区，环境相对湿度较低，土体长期处于高吸力状态，此时吸附作用占优。不少学者通过轴平移技术控制吸力对非饱和土的强度特性进行了研究^[5-6]，得到的结论大多局限于以毛细作用为主的低吸力范围。近几年，已有学者针对黏土在高吸力下的持水和强度特性展开研究^[7-8]，但针对非饱和粗细混合土在低饱和度下的强度特性鲜有报道，试验数据积累不充分，演化规律不清晰。

目前，试验室现有的非饱和土试验设备大多采用轴平移技术来控制基质吸力。受陶土板进气值和气源压力的限制，轴平移技术所能施加的吸力范围有限(吸力 $\psi < 1500$ kPa)。在高吸力范围内，湿度控制技术是最常用的吸力控制方法^[9-10]。然而土样在高吸力下达到平衡的时间极为漫长，通常需要数月的时间^[11]。因此，开发可靠且常规的控制和测量高吸力的试验方法势在必行，以研究宽饱和度范围内土体的强度演化规律。

本文针对不同细粒含量的非饱和粗细混合土开展直剪试验，研究粗细混合土在宽饱和度范围内的抗剪强度随饱和度的变化规律，为构建宽饱和度范围内的非饱和土强度模型奠定数据基础。

1 试验概况

1.1 试验材料

本文采用的标准砂和粉质黏土分别来自中国福建和青海，其中标准砂的相对质量密度 G_s 为 2.65，最大干密度和最小干密度分别为 1.95, 1.56 g/cm³；粉质黏土的液塑限分别为 27.2%, 15.1%，相对质量密度 G_s 为 2.70，最优含水率和最大干密度分别为 15.5%, 1.75 g/cm³。根据干土质量百分比，人工配置了 7 种不同细粒含量 (fines content, FC) 的粗细混合土用于试验，其级配曲线如图 1 所示，粗细粒的分界粒径为 0.075 mm。根据粗细混合土中的 FC 将试样分别命名 FC 为 16%, 24%, 36%, 50%, 65%, 80%, 100%。

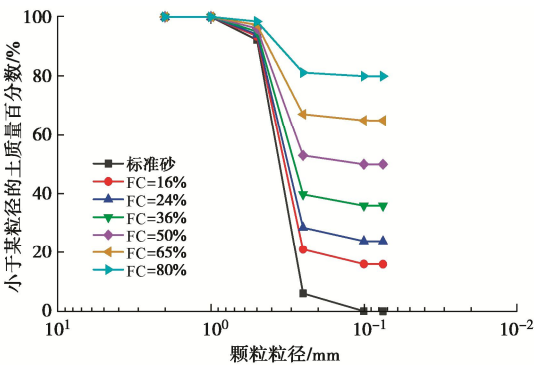


图 1 试验用土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of test soils

由于研究的 7 种粗细混合土的 FC 跨度比较大，土体分类从砂土转变为粉质黏土，控制相同的干密度对于低 FC 的土体不易成样，不宜也无法按照相同的干密度进行制样，因此采用控制相同的击实功制备土样^[12-13]。试样的最优含水率按照下式估算^[14]：

$$w_{opt} = w_1 \cdot \eta + w_2 \cdot (1 - \eta) \quad (1)$$

式中： w_{opt} 为混合土样最优含水率 (%)； w_1 为细粒土的最优含水率， $w_1=15.5\%$ ； η 为细粒含量 (%)； w_2 为粗粒土的最优含水率，建议取值为 5.0%。

按照式 (1) 计算得到的最优含水率 (表 1) 进行配料，再用标准击实功 (592.2 KJ/m³) 进行击实制样，粗细混合土的制样干密度 ρ_d 见表 1。制备的 7 种粗细混合土试样的照片如图 2 所示，随着 FC 的增加，土体骨架逐渐由粗粒控制转变为细粒控制。

表 1 粗细混合土的制样干密度和含水率

Table 1 Dry densities and water contents of test soils							
FC/%	16	24	36	50	65	80	100
$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	1.89	1.94	2.04	2.00	1.94	1.81	1.68
$w_{opt}/\%$	6.7	7.5	8.8	10.3	11.8	13.4	15.5

1.2 土-水特征曲线

(1) 制样方法及试验步骤

土-水特征曲线 (SWCC) 对分析非饱和土的抗剪强度起着至关重要的作用，在进行抗剪强度特性试验之前，联合滤纸法和露点水势仪法测定不同 FC 土样

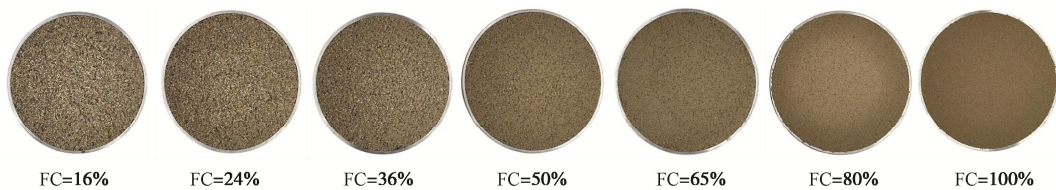


图 2 不同 FC 粗细混合土的试样照片

Fig. 2 Photos of coarse-fine mixed soils with different FCs

在宽吸力范围内 SWCC。具体制样过程及试验步骤如下：

a) 将青海粉质黏土碾碎、烘干、过 0.075 mm 的筛，按照质量百分比，计算青海粉质黏土和烘干后标准砂所需的质量，搅拌混合，配制不同 FC 的粗细混合土料。

b) 根据干土的质量，按最优含水率配制湿土，放置于密封袋中静置 48 h，以保证水分分布均匀，然后将配好的试验土料在标准击实功下（592.2 kJ/m³）制成环刀土样（直径 6.18 cm，高 2.0 cm）。

c) 真空抽气饱和试样 48 h。然后将饱和试样风干至不同饱和度。另取一组饱和试样在 105℃烘箱中烘至完全干燥的状态。

d) 对于饱和度高于 20%的土样，采用直接接触式滤纸法测量土体的基质吸力，在土样上放置 3 层滤纸（中间为 Whatman No.42 型滤纸，上下两层为普通滤纸，起到保护作用），并密封养护。养护时间由饱和度和较低的试样确定，且不少于 7 d。待土体内部水分平衡后测量滤纸及试样含水率。根据率定曲线方程^[15]确定土样的基质吸力，

$$\lg \psi = \begin{cases} -0.0370w + 3.9825 & (w < 59.5\%) \\ -0.0112w + 2.4423 & (w \geq 59.5\%) \end{cases} \quad (2)$$

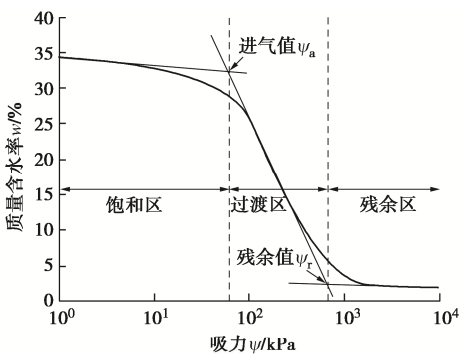
式中： ψ 为基质吸力（kPa）； w 为平衡后的滤纸含水率（%）。

e) 对于饱和度低于 20%的土样，采用美国 Decagon 公司生产的 WP4C 型露点水势仪测量土体在高吸力段的 SWCC。

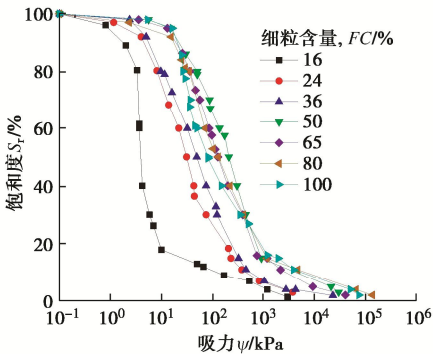
(2) SWCC 测量结果

土-水特征曲线的特征值（进气值和残余值）可通过图解法确定，如图 3（a）所示，在边界区、过渡区和残余区分别画直线，这 3 条直线两两相交，得到的交点即为进气值和残余值。不同 FC 土样的 SWCC 结果见图 3（b），3（c），对应的主要参数见表 2。

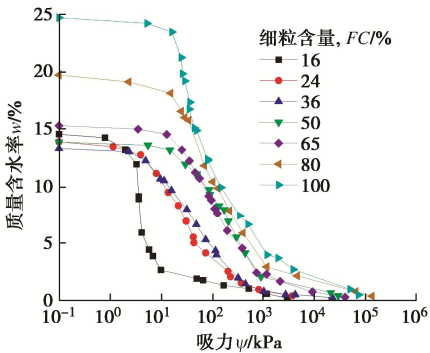
可见，随着 FC 的增加，土-水特征曲线的进气值 ψ_a 和残余值 ψ_r 增大，进气之后，脱水速率减小，其原因在于粗颗粒之间的孔隙逐步被细颗粒所填充，其土体内部孔径逐渐变小^[16]。不同 FC 的粗细混合土的残余饱和度值 S_{re} 为 14.0%~16.0%，范围较为接近。



(a) 通过图解法确定进气值和残余值



(b) 吸力与饱和度的关系



(c) 吸力与质量含水率的关系

图 3 土-水特征曲线

Fig. 3 Soil-water characteristic curves

1.3 非饱和土的剪切破坏试验

(1) 基本思路

传统非饱和土抗剪强度的试验方法多采用轴平移技术控制吸力，进行等吸力条件下非饱和土强度试验，剪切过程中为保证土中水/气平衡，需要采用较慢的剪切速度，因此试验非常耗时。

土体饱和度 S_r 同时包括了毛细水和吸附水，可以用来量化不同赋存状态的水分对非饱和土强度的贡

献, 因此本文选择饱和度 S_r 作为基本变量对粗细混合土的非饱和强度进行研究。通过控制土样的饱和度(含水率), 可快速成批制备具有不同初始饱和度的非饱和试样, 再采用直剪试验进行非饱和土剪切特性的测定。直剪试验所用的试样厚度较薄, 可节约试验时间, 另外, 通过测量剪切过程中的竖向变形, 能直观地反映土样的剪胀特性。但值得注意的是, 在剪切过程中, 饱和度会随试样体变和含水率的变化而略有波动。

表 2 土-水特征曲线的主要参数

Table 2 Main parameters of soil-water characteristic curves

FC/%	ψ_a/kPa	ψ_r/kPa	$S_{re}/\%$
16	2.5	9.0	15.8
24	6.2	98.6	14.4
36	8.5	450.0	14.3
50	16.0	700.0	15.5
65	16.6	750.0	15.6
80	20.0	1000.0	14.6
100	25.0	1300.0	14.6

注: ψ_a 为进气值, ψ_r 为残余值, S_{re} 为残余饱和度。

(2) 试验方案

通过直剪试验研究土体在宽饱和度范围内的抗剪强度、变形和破坏模式的演变规律, 剪切过程中系统自动采集推力、水平和竖向位移等数据。详细的制样过程见 1.2 节, 获得养护后不同饱和度的土样, 采用应变控制式电动直剪仪进行直剪试验, 试验过程中排气不排水, 剪切盒内依次放置透水石、硬塑料薄膜、试样、硬塑料薄膜、透水石、位移计。选取的垂直压力为 50, 100, 200, 300 kPa, 剪切速率设置为 0.8 mm/min。剪切结束后, 采用烘干法测量试样的含水率, 发现装样前与试验后的含水率基本不变。

本试验项目共包括 2 组试验: ①宽饱和度范围内的直剪试验, 试样初始饱和度的控制范围介于完全饱和至完全干燥, 至少包括 10 个以上饱和度水平; ②针对七种不同粗细混合土 FC 为 16%, 24%, 36%, 50%, 65%, 80%, 100%开展直剪试验。第一组试验的目的是研究非饱和粗细混合土在宽饱和度范围内的抗剪强度特性。第二组试验研究细粒含量对非饱和粗细混合土抗剪强度特性的影响。

2 非饱和土的破坏形式

2.1 非饱和土强度的直剪试验测量结果

首先以不同初始饱和度 FC=36%的试样在垂直压力 $\sigma_v=100\text{ kPa}$ 下的剪应力-剪切位移、竖向位移-剪切位移关系曲线为例(图 4)。可以看出, 土体的抗剪强度和剪胀性随着饱和度的降低增幅明显。特别的, 对

于饱和度低于 30%的试样, 土体的强度在达到峰值后迅速下跌至残余强度。总结发现其结果的共性特征如下:

- (1) 饱和度对非饱和土强度的影响呈阶段性, 峰值强度随着饱和度的降低增加, 随着饱和度的继续降低至完全干燥, 其峰值强度减小。
- (2) 随着土样饱和度的降低, 土体剪应力-剪切位移曲线从硬化型转变为软化型, 最后呈现强度断崖式下跌 3 种不同的形式。
- (3) 随着土样饱和度的降低, 土体的剪胀性增大。土体剪切变形特性同样呈现弱剪胀到稳定、强剪胀到稳定和强剪胀转弱剪胀 3 种不同的形式。

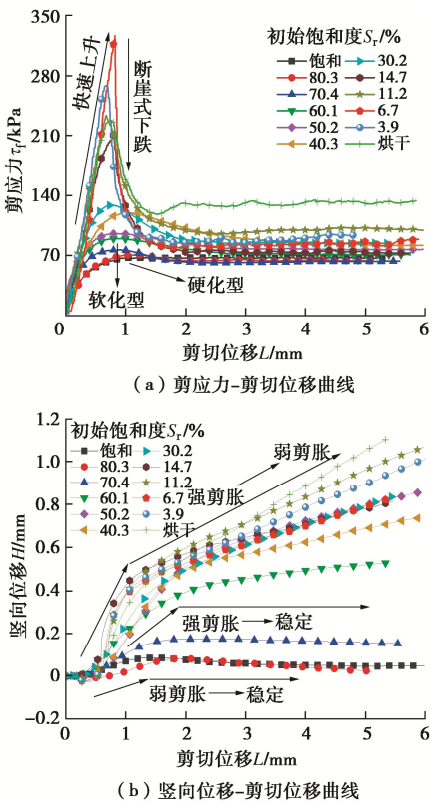


图 4 粗细混合土的强度试验结果 (FC=36%, $\sigma_v=100\text{ kPa}$)
Fig. 4 Results from direct shear tests on coarse-fine mixed soils (FC=36%, $\sigma_v=100\text{ kPa}$)

在宽饱和度范围内非饱和土剪切破坏形式呈现塑性和脆性变形两类。

(1) 塑性变形

a) 剪应力-剪切位移曲线硬化型

强度表现为无峰值, 土体变形分为剪缩、弱剪胀(或无剪胀)、体应变稳定或下降 3 个阶段。通常发生在 FC 较多的高饱和度土中, 即饱和度位于土-水特征曲线的饱和区。

b) 剪应力-剪切位移曲线软化型

强度出现峰值, 土体变形分为剪缩、强剪胀、体应变稳定或弱剪胀 3 个阶段。一般发生在较为密实的

土体中, 土体的饱和度通常高于残余饱和度, 即饱和度位于土-水特征曲线的过渡区。

(2) 脆性变形

强度快速上升至峰值后出现断崖式下跌, 土体变形分为剪缩、强剪胀、弱剪胀 3 个阶段。土体中通常含有一定数量的细粒, 脆性变形一般发生在饱和度较低的土体中, 即饱和度位于土-水特征曲线的残余区。

2.2 低饱和度非饱和土的脆性破坏

在非饱和土剪切试验中, 除了存在常见的应变硬化和应变软化两种塑性破坏形式外, 对于饱和度低于残余饱和度的试样还出现了一种类似于岩石和混凝土材料的脆性破坏^[17], 即土体在受力后无显著变形而突然发生破坏, 在宏观力学性质方面往往出现剪切强度断崖式的降低, 并很快达到残余强度 (图 4 (a))。由于土体的突然断裂, 剪切破坏面呈凹凸不平 (图 5)。本文将这种低饱和度条件下的非饱和土破坏形式称之为干土的脆性破坏。

干土发生脆性破坏的原因可能为当土体的饱和度低于残余饱和度后, 孔隙间形成的弯液面逐渐消失, 孔隙水以吸附水膜的形式存在。当继续干燥时, 水分逐渐从细粒土形成的团聚体表面和内部排出, 细粒土形成团聚体^[18]。此时, 毛细吸力对土体宏观抗剪强度几乎没有贡献, 吸力以吸附作用力为主, 颗粒或团聚体之间的黏结以物理-化学作用为主, 产生了很强的胶结力, 试样的刚度和脆性显著增加。在剪切过程中胶结强度突然丧失, 导致土体的剪切强度从峰值强度断崖式下跌到了残余强度。因此在 SWCC 曲线的残余区更易发生脆性破坏^[19]。

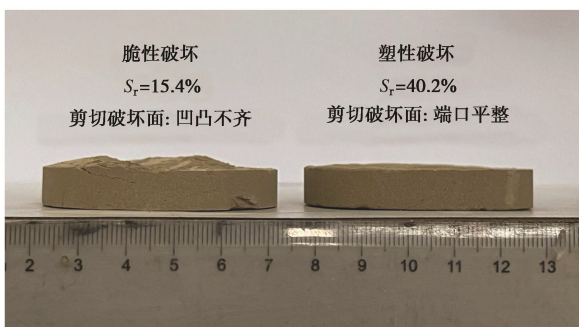


图 5 低饱和度非饱和土的脆性破坏特征 (FC=100%)

Fig. 5 Brittle failure of unsaturated soils with low degree of saturation (FC=100%)

2.3 用于划分非饱和土破坏模式的脆性指数

可以采用脆性指数来描述土体的不同破坏模式, 常用的脆性指数 I_B 为^[17]

$$I_B = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \quad (3)$$

式中: τ_p 为峰值强度 (kPa); τ_r 为残余强度 (kPa); I_B

为峰后应力降的大小, 脆性指数的取值为 0~1, 当 $I_B=0$, 破坏形式为完全硬化型, 当脆性指数 $I_B=1$, 破坏形式为理想的脆性。

脆性指数 I_B 以峰值强度和残余强度为基础, 考虑土体脆性与峰后应力降大小的关系, 认为峰后应力降越大, 土体的脆性越强, 但是这种方法没有考虑到应力对跌落速度的影响, 即相同应力降条件下, 应力跌落速率快的脆性越强, 如图 6 所示, OAB 与 OCD 的峰值强度和残余强度接近, 但 OCD 应力跌落的速率远大于 OAB 应力跌落的速率, OCD 的脆性明显越强。因此, 基于本文的试验数据, 采用新的脆性指数评价方法^[20], 脆性指数 B_d 定义如下:

首先定义

$$B_1 = \frac{\lg|k_{AC}|}{10} \quad (4)$$

式中: B_1 为峰后应力降的绝对速度; k_{AC} 为从峰值强度到残余强度起始点连线的斜率的绝对值, 取值为 0~1。

然后将式 (3), (4) 相乘, 得到表征土体脆性程度大小的脆性指数 B_d 为

$$B_d = I_B \cdot B_1 = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \cdot \frac{\lg|k_{AC}|}{10} \quad (5)$$

式中: B_d 取值为 0~1, 数值越大表示脆性程度越高。

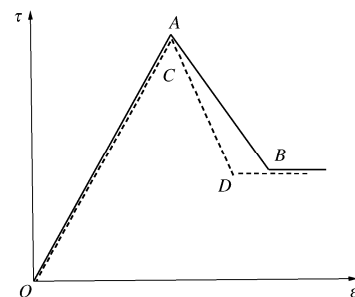


图 6 脆性指数 I_B 的局限性^[20]

Fig. 6 Sketch for limitation of brittleness index I_B ^[20]

基于剪切强度-剪切位移曲线变化规律, 利用式 (5) 建立不同 FC 下饱和度与脆性指数 B_d 的变化关系, 如图 7 所示。可以看出, 脆性指数 B_d 随着饱和度的减小而增大, 在不同的饱和度范围内, 脆性指数增长的速率略有差别, 这与土中水的作用机制相关。当饱和度大于残余饱和度 S_{re} 时, 脆性指数随着饱和度的减小缓慢增大, 此时毛细作用对土体的刚度的影响占主导地位。而当饱和度低于残余饱和度 S_{re} 时, 脆性指数随着饱和度的减小显著增大, 其主要原因是, 此阶段水分逐渐从细粒土形成的团聚体表面和内部排出, 吸力以吸附作用为主。在干燥过程中, 土颗粒、结合水、黏土矿物和游离氧化物等相互之间形成复杂的物

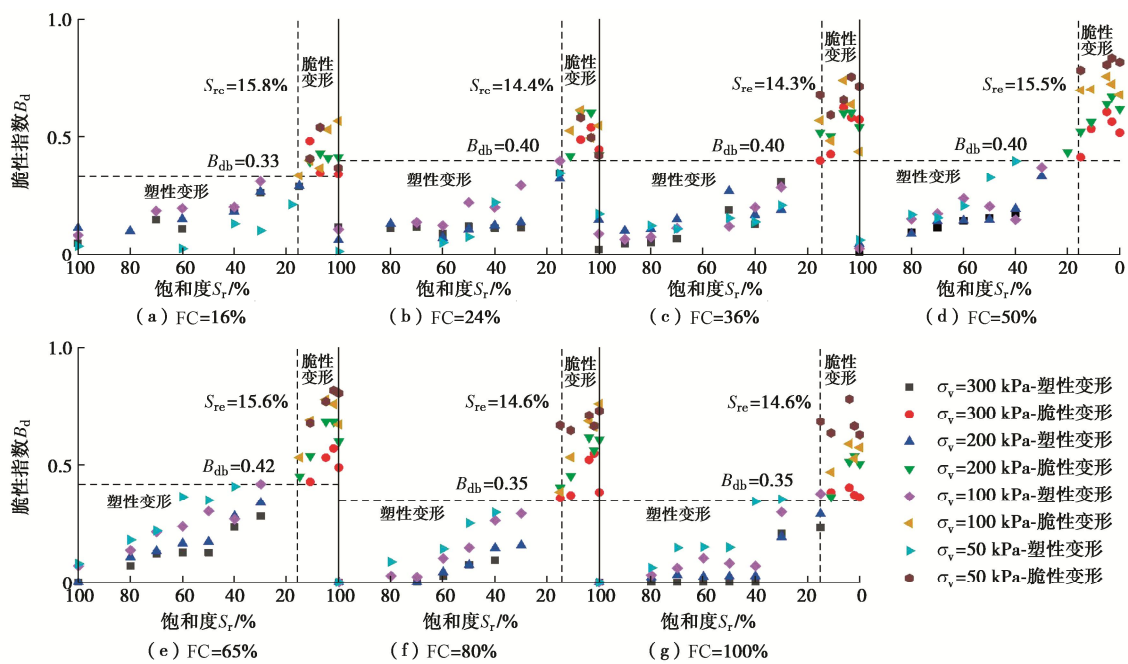


图 7 不同 FC 粗细混合土的脆性指数随饱和度变化规律

Fig. 7 Variation of law of brittleness index with degree of saturation

理化学作用，共同构成了集聚体间的强胶结力。因此脆性指数显著增加。将不同 FC 粗细混合土的残余饱和度和 S_{re} 作为分界线（本文定义为分界饱和度）。分界线右侧数据集中的区域为脆性破坏区，分界线左侧数据集中的区域为塑性破坏区。如图 7 所示，可以构建划分塑性破坏区和脆性破坏区的分界脆性指数 B_{db} （纵坐标的分界线）。FC 为 16%~100% 粗细混合土的分界脆性指数 B_{db} 分别为 0.33, 0.40, 0.40, 0.40, 0.42, 0.35, 0.35，其平均值约为 0.38，小于该分界脆性指数的土体的破坏形式为塑性变形，大于分界脆性指数的土体，破坏形式为脆性变形。

3 非饱和土剪切变形特性分析

3.1 非饱和土的剪胀性

本文假定在剪切过程中，试样的应变是均匀分布的。图 8 展示了两种典型破坏形式的竖向位移/抗剪强度-剪切位移关系。

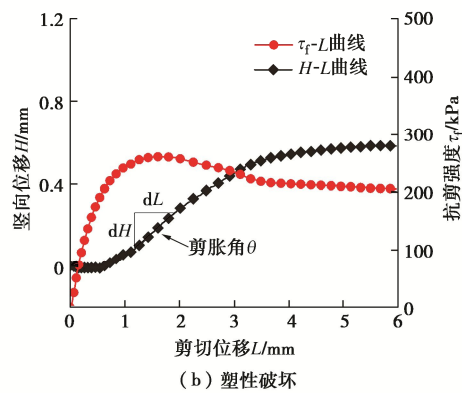
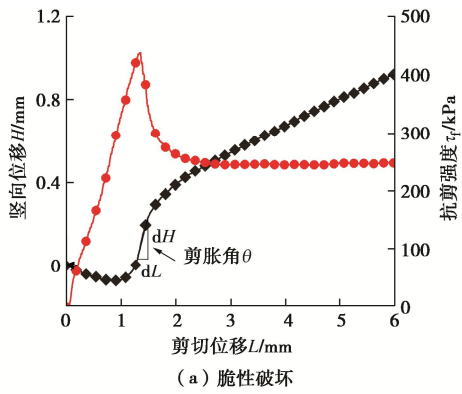


图 8 非饱和土的脆性破坏和塑性破坏特征描述

Fig. 8 Brittle and plastic failure characteristics

非饱和土剪切过程中，会发生明显的剪胀，其中剪胀角的定义为

$$\tan \theta = \frac{dH}{dL} \quad (6)$$

式中： θ 为土体剪胀角 ($^{\circ}$)； $\tan \theta$ 为剪胀量； H , L 为竖向位移和剪切位移 (mm)。当剪胀量取正值时，土样发生剪胀，反之发生剪缩。其中最大剪胀角（为了简单起见，下文统称为剪胀角）对应着发生剪切变形时剪胀量的最大值。

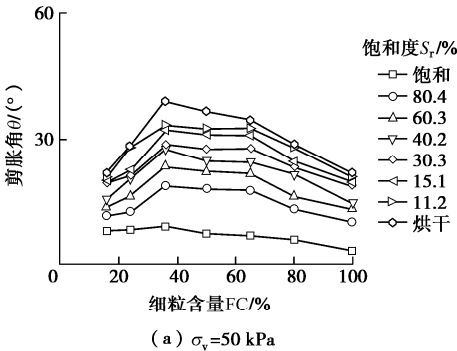
3.2 FC 对非饱和土剪胀角的影响分析

不同 FC 粗细混合土的剪胀角见图 9 所示，可以看出：当土体含细粒较少 (16%, 24%) 和较多 (80%, 100%) 时，土体的剪胀角相对较小，而 FC 为 36%, 50%, 65% 土体的剪胀角相对较高。

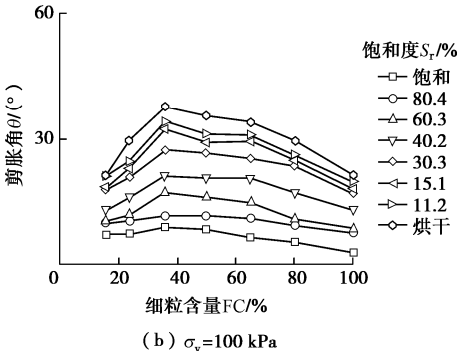
土体的 FC 决定了土体的骨架结构^[21]，随着 FC

含量的增加,土骨架逐渐从粗粒控制转变为细粒控制,根据文献[22],其临界细粒含量大概为 30%~40%。结合图 2 可知,当 FC 含量小于 36%时,粗细混合土的土骨架由粗粒组成,细粒填充在粗粒间的孔隙里,土体结构为骨架-孔隙型,结构相对疏松,土体的剪胀角也相对较小。当 FC 含量大于 65%时,粗细混合土的土骨架由细粒组成,粗颗粒悬浮于细粒土中间,土体结构为骨架-悬浮型,此时土的行为受细粒的控制,粗粒的存在对土体的影响有限。在过渡组即细粒含量为 36%,50%,65%的土体,土骨架由细颗粒和粗颗粒共同组成,粗细颗粒相互填充,试样处于较密实状态,土体结构为骨架-密实型,土颗粒之间紧密地咬合在一起,在剪切过程中,试样呈现较强的剪胀性,其剪胀角也最大。

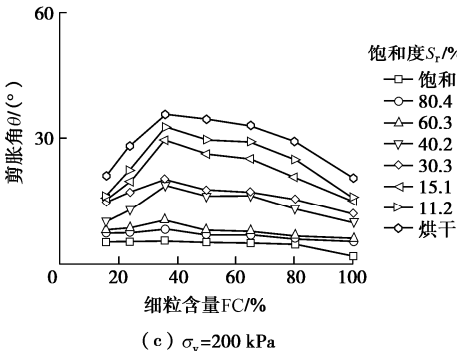
从图 9 中还可以看出,对于同一种粗细混合土,最大剪胀角随土样饱和度的降低不断增加。同一饱和度条件下,垂直压力越大,最大剪胀角越小。



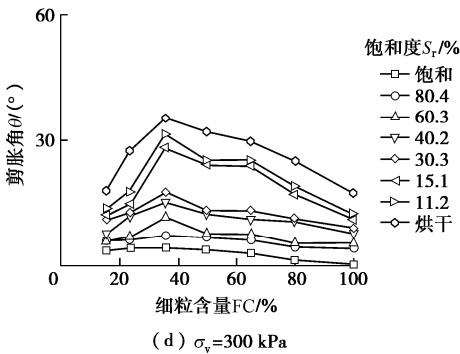
(a) $\sigma_v=50$ kPa



(b) $\sigma_v=100$ kPa



(c) $\sigma_v=200$ kPa



(d) $\sigma_v=300$ kPa

图 9 不同 FC 混合土体的剪胀角比较

Fig. 9 Dilation angles of coarse-fine mixed soils

注:图 9 和图 11 中的饱和度取平行土样初始饱和度的平均值。

4 非饱和土的强度特征分析

4.1 初始饱和度对峰值强度的影响

土体峰值强度随饱和度和吸力变化的规律见图 10,图 10 中可以看出土体的抗剪强度随着饱和度的变化可以分为缓慢增长区、快速上升区和峰后下降区 3 个阶段。

如图 10 (a) 所示,缓慢增长区与快速上升区的分界饱和度约在 40.0%~60.0%(该分界点定义为临界饱和度 S_{rc}),即土从饱和到 S_{rc} 这一阶段,土体抗剪强度缓慢增加。这个阶段,颗粒间的孔隙水从完全饱和变成非饱和,孔隙中形成了弯液面,非饱和引起强度的增加主要由于颗粒间的毛细作用。根据图 10 (b) 所示,在该饱和度范围内粗细混合土相对应的吸力值较小,最小吸力值约为 2~5 kPa,最大吸力值约为 300 kPa。土体的基质吸力增加幅度有限,因此毛细作用对土体的抗剪强度的贡献较小。

随着饱和度的继续降低,土体强度进入快速上升区。在这个阶段,孔隙中以水-气弯液面形式存在的毛细水逐渐减小,弯液面的曲率不断增加,毛细力快速增大,土的强度和刚度增加。如图 10 (b) 所示,基质吸力的跨度较大,从几千帕到几兆帕(FC 为 16%,24%)或从几兆帕到几十兆帕(FC=100%),土体的抗剪强度随着饱和度的降低迅速提高,直至峰值。如图 10 (a) 所示,随着竖向压力的增加,快速上升阶段的速率逐渐增加。因为孔径随着竖向压力的增大变小。这也证明了这个阶段强度的增加由毛细力主导。

随着饱和度的进一步降低,土中水的主要形式从毛细水转变为结合水,最后主要以吸附水的形式存在。随后,水分开始从细粒土形成的集聚体内排出^[21],集聚体的刚度和脆性增加。土体在剪切过程中呈现出脆性破坏(图 5)。当结合水(吸附水膜)无法维持土体骨架之间的胶结时,土体吸附作用开始逐步减弱,土

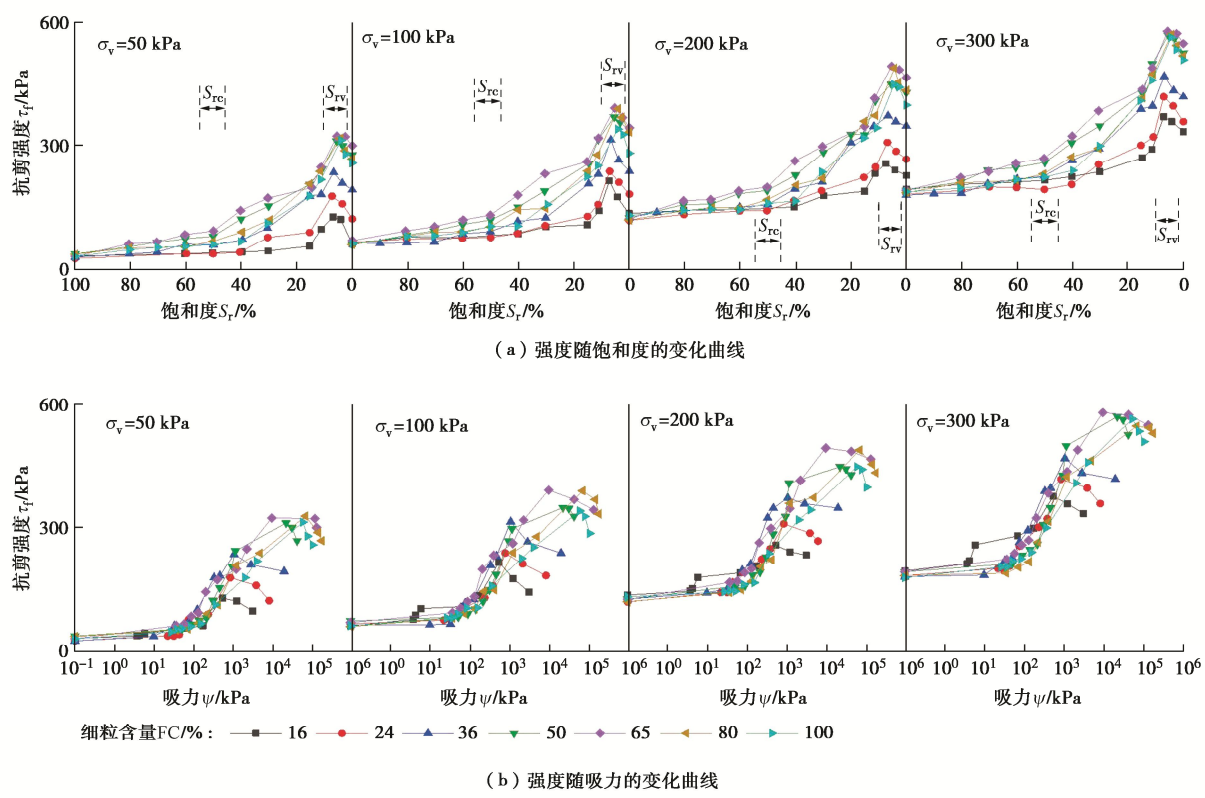


图 10 非饱和强度随饱和度和吸力的变化规律

Fig. 10 Variation of unsaturated strength with degree of saturation and suction

体骨架之间的接触力就会降低, 从而导致土体强度降低。一些研究成果也同样表明, 处于低饱和度状态下的非饱和土会出现强度下降的趋势^[23]。

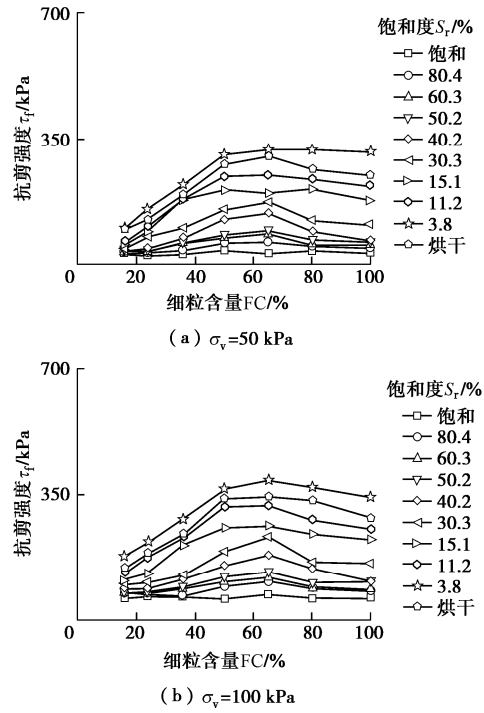
在宽饱和度范围内, 非饱和土的强度随饱和度的降低会出现一个强度最大值, 本文将这一强度最大值称之为非饱和土强度极值。如图 10 (a) 所示, FC 为 16%, 24%, 36%, 50%, 65%, 80%, 100% 的非饱和土强度极值对应的饱和度 S_{rv} 为 4.0%~8.0%。

4.2 FC 对峰值强度的影响

细粒含量是粗细混合土的重要物理参数, 它直接影响到土体的结构特征, 进而影响土体的强度。根据考察的细粒含量, 可以分为 3 个区段: 粗粒控制组 (FC 为 16%, 24%)、过渡组 (FC 为 36%, 50%, 65%) 和细粒控制组 (FC 为 80%, 100%)。研究指出粗粒控制组的抗剪强度主要源自粗颗粒之间摩擦力, 细粒控制组的抗剪强度与粉质黏土强度基本相同, 过渡组的强度则受粗粒与细粒的共同影响。

试验结果如图 11 所示 (为了统一表达, 其中饱和度 3.8% 的部分数据通过已有试验结果插值获得), 在饱和时, FC 对于土体强度的影响不大。在非饱和时, 随着 FC 的增加, 土体强度呈先增大后减小的趋势, 转折点对应的 FC 阈值为 65%, 这是因为此时混合土中粗细粒的分布较为均匀, 粗颗粒构成了土体的骨架 (颗粒之间紧密咬合在一起), 而细颗粒充满了粗粒间

的孔隙, 在相同击实功下, 土体的干密度也相对较大, 形成了密实型的土体结构, 土体强度相对较高。当 FC 小于 65%, 随着 FC 的减少, 土体成分逐渐由粗粒控制, 土颗粒间的孔径逐渐变大, 在相同饱和度下, 毛细作用对非饱和强度的贡献减小。当 FC 大于 65%, 土体成分逐渐由细粒控制, 细颗粒承担着土体的骨架结构, FC 的增加对抗剪强度影响甚微。



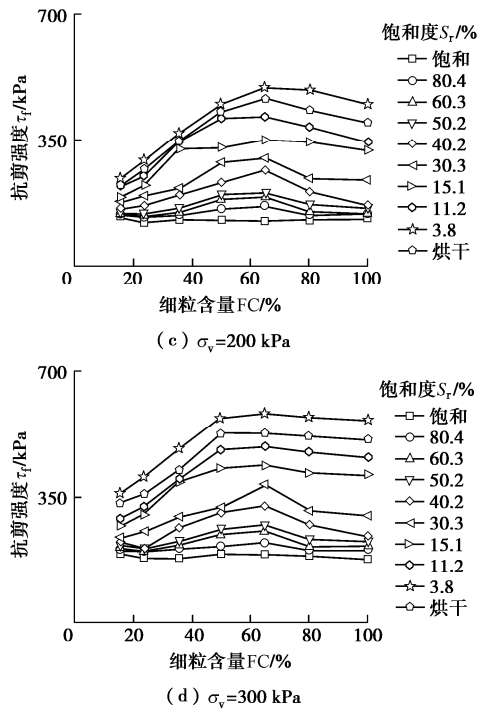


图 11 不同 FC 下粗细混合土的强度对比

Fig. 11 Comparison of shear strengths of coarse-fine mixed soils

根据试验结果,在相同击实功压实后,由不同含量的标准砂和青海粉质黏土组成的粗细混合土,其最大土体强度对应的 FC 在 50%~80%。

4.3 关于非饱和土强度特征的讨论

非饱和土强度受多种因素的影响,包括土的类型、压实度、颗粒分布和应力状态等。土的种类是影响非饱和土强度的重要因素,不同类型的非饱和土的强度随饱和度(吸力)的变化规律不同。对文献中非饱和土强度数据进行收集和总结,不同类型的土体在宽饱和度和范围内的强度特性如图 12 所示。

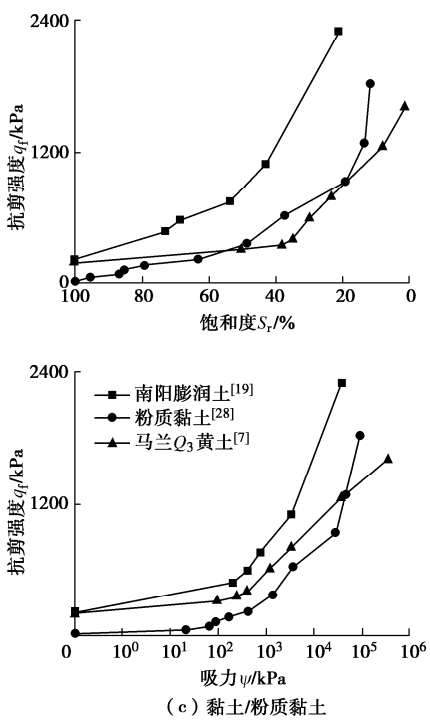
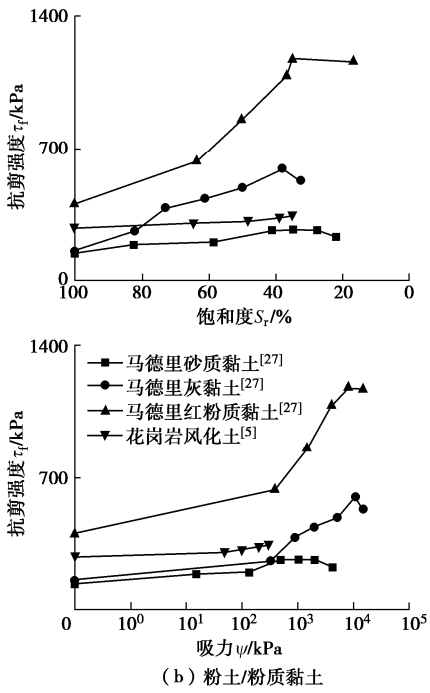
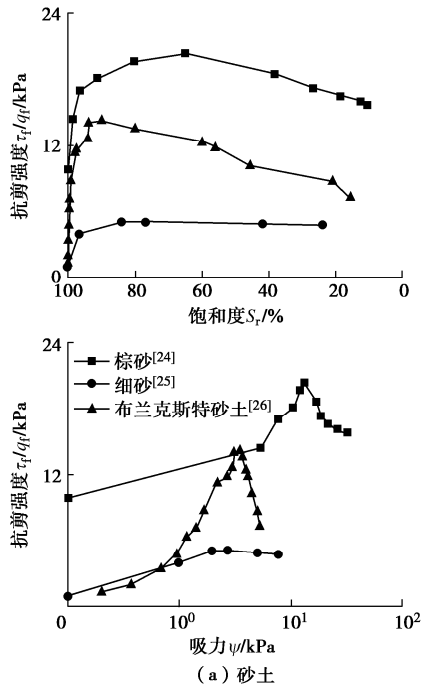


图 12 不同类型土的强度随饱和度和吸力的变化规律

Fig. 12 Variation of shear strength of different types of soils with saturation and suction

图 12 (a) 表示 3 种不同类型砂土的抗剪强度特性,在广吸力和宽饱和度范围内的强度特性基本相同,即强度随着饱和度的降低先增大,当饱和度达到某一值时,其强度达到峰值,随着饱和度的进一步降低,其强度迅速减小,非饱和砂土的强度呈现“山峰”效应;图 12 (b) 展示了 4 种不同粉土或粉质黏土在饱和度 20%~100% 的强度特性,随着饱和度的降低其强度增长到某一稳定值后基本保持不变或者是增加到某

一最大值后随着饱和度降低出现略微下降的趋势; 对于部分粉质黏土或黏土 (图 12 (c)), 随着饱和度的降低, 土的强度持续增加且不会出现下降的趋势。

基于上述结果与讨论, 不同类型土的抗剪强度随着饱和度的降低呈现 3 种变化规律 (图 13): ①第一类山峰型, 如砂土, 强度随饱和度的降低呈先增大后减小的规律, 在脱湿过程中非饱和土强度存在极值; ②第二类为稳定型, 如粉土或粉质黏土, 随着饱和度的降低其强度增长至某一稳定值后保持基本不变或略微下降^[29]; ③第三类为增长型, 如粉质黏土或黏土, 其强度随着饱和度的降低不断增大。

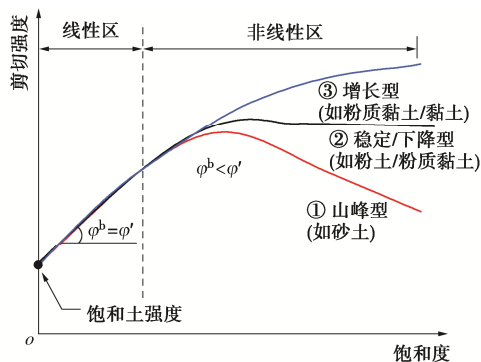


图 13 不同类型非饱和土强度特性示意图^[30]

Fig. 13 Types of shear strength for unsaturated soils^[30]

5 结 论

基于室内试验数据, 本文初步探明了宽饱和度范围内饱和度与细粒含量对非饱和粗细混合土强度和变形特性的影响规律。

(1) 随着饱和度的改变, 非饱和土的剪切破坏形式发生变化。当土体的饱和度在低于残余饱和度后会产生一种新的破坏形式——脆性破坏, 其主要特征是剪切强度随着剪切位移迅速上升, 到达峰值强度后会出现断崖式下跌, 并迅速降低至残余强度。土体剪切面发生断裂, 破坏面凹凸不平。剪切变形在经过初始微小的压缩后, 先发生强剪胀的变形, 后发生弱剪胀变形。

(2) 常用的脆性指数 I_B 具有无法描述应力跌落速率的局限性, 采用修正的脆性指数 B_d 可以很好地划分粗细混合土的塑、脆性破坏。

(3) 随着饱和度的降低, 粗细混合土的非饱和强度呈现“山峰效应”, 依次经历缓慢增长→快速上升→峰后下降 3 个过程。

(4) 随着细粒含量 FC 的增加, 土骨架由粗颗粒控制逐渐转变为细粒控制, 非饱和粗细混合土的抗剪强度呈先增大后减小的趋势, 其强度最大值所对应的 FC 在 50%~80%, 细粒含量对非饱和粗细混合土的强

度、变形和剪胀特性有明显的影

参考文献:

- [1] 詹良通, 李鹤, 陈云敏, 等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(3): 872-880, 886. (ZHAN Liangtong, LI He, CHEN Yunmin, et al. Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rainfall-induced landslides in residual soil slope in Southeastern coastal areas of China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(3): 872-880, 886. (in Chinese))
- [2] ZHAO H F, ZHANG L M, FREDLUND D G. Bimodal shear-strength behavior of unsaturated coarse-grained soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(12): 2070-2081.
- [3] ZHAO H F, ZHANG L M. Effect of coarse content on shear behavior of unsaturated coarse granular soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(12): 1371-1383.
- [4] ZHOU A N, HUANG R Q, SHENG D C. Capillary water retention curve and shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(6): 974-987.
- [5] LEE I M, SUNG S G, CHO G C. Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weathered granite[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(2): 624-631.
- [6] HOSSAIN M A, YIN J H. Behavior of a compacted completely decomposed granite soil from suction controlled direct shear tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(1): 189-198.
- [7] 孙德安, 徐钱垒, 陈波, 等. 广吸力范围内非饱和原状黄土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(9): 1586-1592. (SUN Dean, XU Qianlei, CHEN Bo, et al. Mechanical behavior of unsaturated intact loess over a wide suction range[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(9): 1586-1592. (in Chinese))
- [8] ZHANG J R, SUN D A, ZHOU A N, et al. Hydromechanical behaviour of expansive soils with different suctions and suction histories[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(1): 1-13.
- [9] NG C W W, SADEGHI H, JAFARZADEH F. Compression and shear strength characteristics of compacted loess at high suctions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(5): 690-699.
- [10] PATIL U D, PUPPALA A J, HOYOS L R, et al. Modeling critical-state shear strength behavior of compacted silty sand via suction-controlled triaxial testing[J]. Engineering Geology, 2017, **231**: 21-33.

- [11] 高游. 广吸力范围内非饱和土的土水和力学特性研究[D]. 上海: 上海大学, 2018. (GAO You. Study on Soil Water and Mechanical Properties of Unsaturated Soil in Wide Suction Range[D]. Shanghai: Shanghai University, 2018. (in Chinese))
- [12] 郭志杰. 细粒含量对粗-细粒混合土物理力学特性的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2018. (GUO Zhijie. Effect of Fine Particle Content on Physical and Mechanical Properties of Coarse-Fine Mixed Soil[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [13] 史新, 庞康, 李旭, 等. 宽级配砾质土防渗性能研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 2): 189-193. (SHI Xin, PANG Kang, LI Xu, et al. Hydraulic conductivity of widely-graded gravelly soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 189-193. (in Chinese))
- [14] 庞康. 宽级配砾质土压实性和渗透性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015. (PANG Kang. Study on Compactness and Permeability of Wide Graded Gravel Soil[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [15] 李旭, 刘阿强, 刘丽, 等. 全吸力范围内土-水特征曲线的快速测定方法[J]. 岩土力学, 2022, **43**(2): 299-306. (LI Xu, LIU Aqiang, LIU Li, et al. A rapid method for determining the soil-water characteristic curves in the full suction range[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(2): 299-306. (in Chinese))
- [16] 田湖南, 孔令伟. 细粒对砂土持水能力影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 56-60. (TIAN Hunan, KONG Lingwei. Experimental research on effect of fine grains on water retention capacity of silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 56-60. (in Chinese))
- [17] BISHOP A W. Progressive failure with special reference to the mechanism causing it[C]// Proceedings of the Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks, Oslo, 1967: 142-150.
- [18] ZHAO H F, CHEN Y D, ZHOU Z X, et al. Consequence of drying on the compression behaviour of soft clay[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, **80**(10): 7933-7944.
- [19] ZHANG J R, NIU G, LI X C, et al. Hydro-mechanical behavior of expansive soils with different dry densities over a wide suction range[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(1): 265-278.
- [20] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(6): 1114-1122. (ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(6): 1114-1122. (in Chinese))
- [21] ZHAO H F, ZHANG L M, CHANG D S. Behavior of coarse widely graded soils under low confining pressures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(1): 35-48.
- [22] DAVID SUITS L, SHEAHAN T C, YANG S, et al. Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, **29**(2): 140-10.
- [23] GAO Y, SUN D A, ZHU Z C, et al. Hydromechanical behavior of unsaturated soil with different initial densities over a wide suction range[J]. Acta Geotechnica, 2019, **14**(2): 417-428.
- [24] DONALD I B. Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressures[C]// Proc 2nd Australian and New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Christchurch, 1956: 200-205.
- [25] SUITS L D, SHEAHAN T C, LIKOS W J, et al. Modified direct shear apparatus for unsaturated sands at low suction and stress[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, **33**(5): 1029-27.
- [26] TOWNER G D, CHILDS E C. The mechanical strength of unsaturated porous granular material[J]. Journal of Soil Science, 1972, **23**(4): 481-498.
- [27] ESCARIO V, SÁEZ J. The shear strength of partly saturated soils[J]. Géotechnique, 1986, **36**(3): 453-456.
- [28] VANAPALLI S K, WRIGHT A, FREDLUND D G. Shear strength behavior of a silty soil over the suction range from 0 to 1,000,000 kPa[C]//Proceedings of the 53th Canadian Geotechnical Conference, Montreal, 2000: 15-18.
- [29] 赵煜鑫, 刘艳, 李旭, 等. 非饱和黏性土抗剪强度模型对比分析及参数确定方法[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(增刊 1): 126-131. (ZHAO Yuxin, LIU Yan, LI Xu, et al. Comparative analysis and parameter determination method of shear strength models for unsaturated clayey soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(S1): 126-131. (in Chinese))
- [30] GAO Y, SUN D A, ZHOU A N, et al. Predicting shear strength of unsaturated soils over wide suction range[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(2): 04019175.