

不同细颗粒含量非饱和路基粗粒土填料 静三轴试验研究*

邬智峰, 崔 凯, 李琼林

(西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要:粗粒土通常作为道路基层和底基层填筑材料以承受荷载,其力学特性对于整个路基结构的服役性能至关重要。为探讨细颗粒含量和初始基质吸力对非饱和粗粒土力学性质的影响,对5种不同细颗粒含量粗粒土进行土水特征曲线测试和不同初始基质吸力下的不排水静三轴试验。试验结果表明,粗粒土土水特征曲线受细颗粒含量影响,在相同的体积含水率下,细颗粒含量越高的粗粒土试样基质吸力越大。在相同的初始基质吸力作用下,随着细颗粒含量的增加,粗粒土的应变软化程度逐渐减弱,峰值强度快速下降,抗剪强度指标内摩擦角和黏聚力均呈下降趋势。具体而言,内摩擦角在细颗粒含量达到6%前缓慢减少,随后迅速下降;而黏聚力是先快速下降,在细颗粒含量达到9%后逐渐趋于稳定。研究成果可为粗粒土填筑路基的设计及稳定性评估提供技术指导。

关键词:粗粒土; 细颗粒含量; 初始基质吸力; 抗剪强度

中图分类号:U416 **文献标志码:**A

道路基层和底基层通常采用粗粒土填料来承受荷载。经过多年的工程实践表明,来自泥浆泵送、相互渗透和颗粒破碎的细颗粒进入基层^[1-2],对道路基层的强度特性有显著影响。大量工程实践和研究结果表明,细颗粒的侵入会导致路基粗粒土填料出现不同程度的强度劣化效应,从而引发路基不均匀沉降或其他道路病害^[3-6]。因此,深入研究不同细颗粒含量路基粗粒土填料的力学特性在实际工程中具有重要意义。

目前,国内外学者针对不同细颗粒含量粗粒土开展了大量的试验研究。Tennakoon等^[7]选用高岭土作为路基粗粒土填料中的细颗粒成分,在不同围压下针对3种细颗粒含量的路基粗粒土填料开展大型排水三轴试验,研究细颗粒含量对粗粒土抗剪强度的影响。结果显示,随着细颗粒含量的增加,粗粒土抗剪强度逐渐减小。在此研究基础上,Indraratna等^[8]对5种细颗粒含量的路基粗粒土填料开展大型排水三轴试验,试验结果与前述一致,并总结了峰值强度与细颗粒含量之间的经验公式。元帅^[9]也通过三轴试验发现,细颗粒含量的增加会导致粗粒土试样的静强度下降。凌华等^[10]进行了大型排水三轴试验,探究细颗粒含量对粗粒土抗剪强度的影响,发现随着细颗粒含量的增加,粗粒土的黏聚力呈现下降趋势,而内摩擦角逐渐增大。Chen等^[11]开展静三轴剪切试验,分析了不同细颗粒含量对粗粒土抗剪强度的影响,结果表明,当红黏土含量较少时,粗粒土的内摩擦角缓慢减小,但当红黏土含量达到一定限度后,由于细颗粒的充分润滑作用,粗颗粒之间的接触作用逐渐减弱,内摩擦角迅速减小。赵明志等^[12]研究了4种细颗粒含量高压密粗粒土在不同含水状态下的不排水三轴强

* 收稿日期:2024-11-11; 修回日期:2024-12-28

基金项目:国家自然科学基金项目(42177128,52178356)

作者简介:邬智峰(1999—),男,江西丰城人,2022级硕士研究生。E-mail:15070919739@163.com

通信作者:崔 凯(1979—),男,山东烟台人,教授,博士。主要研究方向为岩土工程。E-mail:cukai@swjtu.cn

度和抗剪强度,试验结果表明,随着细颗粒含量增加,粗粒土的内摩擦角和峰值强度均呈现先增大后减小的变化规律,并在细颗粒含量约为10%时达到峰值。李小梅等^[13]利用大型三轴仪研究不同级配和密度对粗粒土强度和变形特性的影响,结果显示,随着粗粒土试样中细颗粒含量的增多,其应变软化现象愈加明显。上述研究表明,国内外学者已围绕细颗粒含量、围压、含水量等主要影响因素对粗粒土的变形和强度特性进行了深入研究,并取得了丰富的研究成果。在实际的路基工程中,路基粗粒土填料通常位于水位之上,导致土体处于非饱和状态。目前,针对土体非饱和状态的研究方法主要包括控制含水量和初始基质吸力,然而控制初始基质吸力的相关研究较少,因此深入研究不同初始基质吸力下不同细颗粒含量非饱和粗粒土的力学特性具有现实意义。

鉴于前述,本文首先采用滤纸法对5种不同细颗粒含量粗粒土进行土水特征曲线测试,利用Van Genuchten(VG)模型进行拟合,并分析了细颗粒含量对粗粒土土水特征的影响。随后,对不同细颗粒含量的粗粒土进行了常规三轴试验,分析了细颗粒含量对粗粒土试样应变软化程度的影响规律,并探究了细颗粒含量和初始基质吸力对粗粒土试样抗剪强度的影响,基于摩尔-库仑强度准则,分析了细颗粒含量和初始基质吸力对粗粒土抗剪强度的影响规律。研究成果可以为粗粒土填筑路基设计及稳定性评估提供技术指导。

1 试验过程

1.1 试验材料

本研究中的试验材料是一种由粉质黏土、砂土和级配碎石组成的人工混合物,其常作为道路基层的填筑材料。为了研究细颗粒含量对混合物静强度的影响,参考文献^[14]定义了细颗粒含量参数 FC ,它表示粒径小于0.075 mm的土颗粒与粒径大于0.075 mm土颗粒的干质量的比值。本研究制备了5种不同细颗粒含量(FC)的粗粒土试样,分别为3%、6%、9%、12%和15%,级配均为良好。图1显示了不同细颗粒含量下试样的级配曲线。通过对细颗粒含量为3%的粗粒土进行标准击实试验,确定其最大干密度为 2.216 g/cm^3 ,最优含水率为6.4%。然后,以0.97的压实度作为基准,进一步确定试样中粉质黏土、砂土和级配碎石的质量。为了对比细颗粒含量的影响,将细颗粒含量为6%、9%、12%、15%的试样的干密度均与细颗粒含量为3%的试样的干密度保持一致。通过开展细粒土的液塑限试验,确定细粒土的液限为24.16%,塑限为14.19%。开展土的比重试验,确定粗粒土的比重为 2.79 g/cm^3 ,细粒土的比重为 2.62 g/cm^3 。

1.2 土水特征曲线测定试验

采用滤纸法进行土水特征曲线测试,测试示意图如图2所示。本次测试使用国产“双圈牌 No. 203(慢速)”滤纸,利用接触滤纸测量粗粒土在不同含水率下的基质吸力,其率定方程^[15]为

$$\lg \psi = \begin{cases} 5.493 - 0.0767\omega (\omega \leq 47\%) \\ 2.470 - 0.0120\omega (\omega > 47\%) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ 为基质吸力, ω 为含水率。

滤纸法测基质吸力具体步骤如下:首先,将测试滤纸(直径6 cm)烘干称重,夹在两张保护滤纸

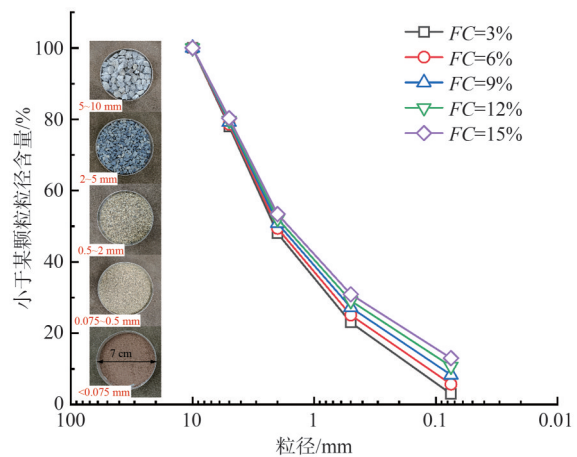


图1 不同细颗粒含量下粗粒土试样级配曲线

Fig. 1 Gradating curves of coarse-grained soil specimens with different fine contents

(直径7 cm)中,然后放置在两个环刀试样之间(注意应使上、下部环刀试样与三张滤纸的中心对齐),并用电工胶带将上、下部环刀试样接口处密封好。然后将试样放入密封容器,再将密封容器放入20℃的恒温环境中静置10 d左右。待密封罐内试样和滤纸达到吸力平衡后,快速取出测试滤纸称重,得到测试滤纸含水率,代入率定方程(1)即可计算出该含水率下试样的基质吸力。

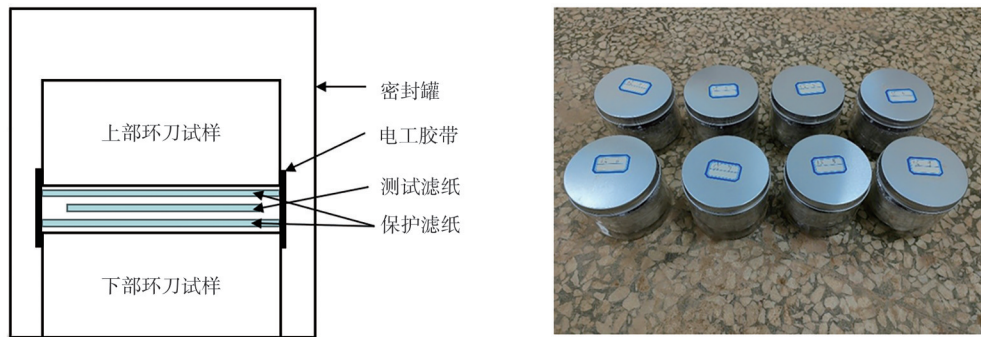


图2 滤纸法测基质吸力示意图

Fig. 2 Schematic of the filter paper method for measuring matric suction

1.3 三轴试验设备与方案设计

本研究均是通过三轴试验系统开展不排水三轴试验,该测试系统配备了围压和反压控制器、轴向加载器和数据采集装置。测试系统的压力控制器能够在0~2 MPa的范围内对试样施加围压和反压。测试系统的峰值轴向承载力为10 kN,最大轴向位移为100 mm。

三轴试样的制备过程:首先,对各个粒径的土壤颗粒进行单独称重,并与适量的水充分混合;然后,将得到的混合物放入一个封闭的容器中,静置12 h,以确保水分在土壤颗粒间均匀分布;随后,将一定数量的混合物放入标准模具,其高度为200 mm,直径为100 mm,并使用落锤对混合物分5层进行压实,每层压实前需对上一层土的表面进行刮毛处理。完成上述步骤后,三轴试样便制备完成。需要强调的是,为了比较初始基质吸力对粗粒土试样的影响,本研究是通过控制初始基质吸力对应的含水率进行制样的。

在试验开始前,将制备好的试样放置在压力室底座上,然后根据试验条件施加相应水平的围压,并在达到设定的围压后保持一段时间。本研究中三轴剪切试验采用应变控制方式,剪切速率为1 mm/min,加载过程直至轴向应变达到15%时结束。试验方案充分考虑了初始基质吸力、围压和细颗粒含量对粗粒土试样的影响,具体试验控制条件见表1。

表1 三轴试验控制条件

Table 1 Control conditions for triaxial test

细颗粒含量 $FC/\%$	初始基质吸力 ψ_0/kPa	围压 σ_3/kPa
3、6、9、12、15	5、10、20	30、60、90

2 试验结果与分析

2.1 土水特征曲线

土水特征曲线能够反映土的体积含水率与基质吸力的关系,可通过特定的数学模型表示,常用模型有VG模型^[16]、Gardner(GD)模型^[17]、Fredlund-Xing(FX)模型^[18]。本文对试验所得含水量与基质吸力数据采用VG模型进行拟合处理,VG模型表达式为

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (2)$$

式中: θ 为体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率; ψ 为基质吸力; α 、 m 、 n 为拟合参数,其中 m 通常认为等于 $1 - 1/n$ 。

式(2)中的饱和体积含水率是根据试样的干密度和比重换算得到。对于残余体积含水率的获取方法尚未有统一标准,本文将残余体积含水率作为一个拟合参数,通过试验数据拟合得到。5组不同细颗粒含量粗粒土的土水特征拟合曲线如图3所示,拟合结果显示,VG模型可以较好地拟合粗粒土基质吸力与体积含水率之间的数学关系,具体的拟合参数如表2所示。

从图3中可以看出,对于相同细颗粒含量的粗粒土试样,基质吸力随体积含水率的增加而减小;对于不同细颗粒含量的粗粒土试样,当体积含水率相同时,基质吸力随细颗粒含量的增加而增加。这是因为细颗粒土的比表面积较大,能够更有效地吸附水分,从而增强毛细作用。

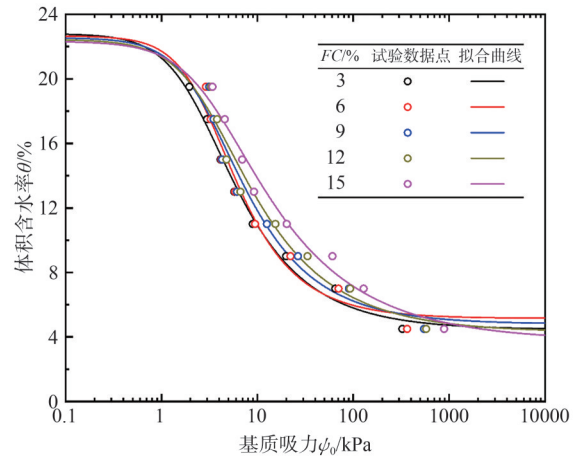


图3 不同细颗粒含量下粗粒土的土水特征曲线

Fig. 3 Soil water characteristic curves of coarse-grained soil at different fine contents

表2 土水特征曲线VG模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of the VG model for soil water characteristic curves

细颗粒含量FC/%	α	m	n	θ_r	R^2
3	0.43	0.41	1.70	4.46	0.99
6	0.33	0.47	1.88	5.15	0.98
9	0.34	0.42	1.71	4.80	0.98
12	0.34	0.38	1.61	4.30	0.98
15	0.30	0.33	1.50	3.77	0.99

2.2 应力-应变特性

2.2.1 应变软化系数

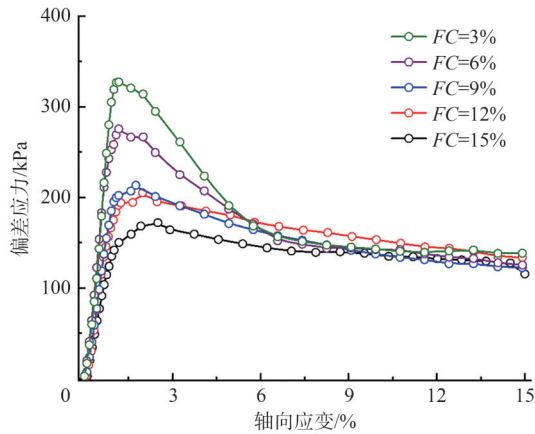
图4展示了5种细颗粒含量粗粒土试样在不同初始基质吸力和不同围压条件下的偏差应力与轴向应变的关系。从图4中可以观察到,在各试验条件下,试样的应力-应变曲线均表现出应变软化特征,即随着轴向应变的增加,偏差应力迅速增加至峰值强度后出现衰减。还可以看出,不同细颗粒含量的试样,其应力-应变曲线下落程度存在差异,这表明细颗粒含量对应变软化程度有影响。为了进一步分析细颗粒含量对非饱和粗粒土应变软化特性的影响,参考文献[19-20],定义应变软化系数为

$$\alpha = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f - (\sigma_1 - \sigma_3)_{\epsilon_1=15\%}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (3)$$

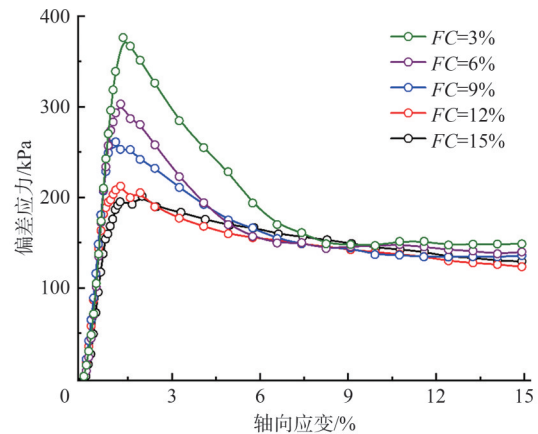
其中: α 为应变软化系数; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为峰值强度; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\epsilon_1=15\%}$ 为残余强度,即轴向应变达到15%时对应的偏差应力。

由式(3)可知,当 $\alpha > 0$,即峰值强度大于残余强度时,应变软化系数 α 越大,应力峰值点后应力下降程度越大。当 $\alpha \leq 0$,即峰值强度等于或小于残余强度时,其力学性质表现为应变硬化,没有出现

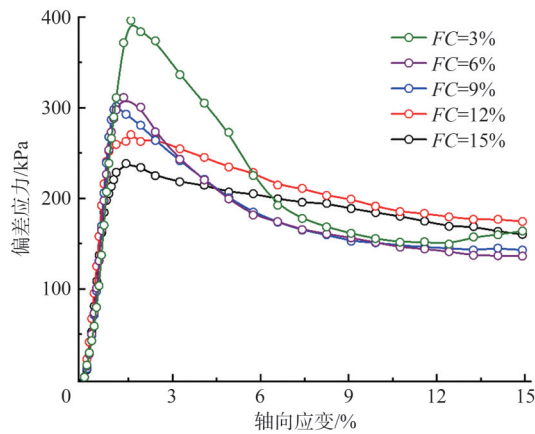
应变软化现象。因此, α 在一定程度上可以较好地反映应变软化程度。不同细颗粒含量粗粒土的应变软化系数见图 5。从图 5 中可以看出, 在相同围压和初始基质吸力条件下, 随着细颗粒含量的增加, 应变软化系数整体呈现下降趋势。例如, 当围压为 30 kPa 时, 试样初始基质吸力控制在 10 kPa, 随着细颗粒含量从 3% 增加至 15%, 应变软化系数由 0.61 降至 0.40。这表明随着细颗粒含量的增加, 粗粒土的应变软化程度减弱, 这与文献 [13] 中结论相反, 原因在于细颗粒粒径的定义不同, 文献 [13] 中定义细颗粒为小于 5 mm 粒径的颗粒, 而在本文中定义细颗粒为小于 0.075 mm 粒径的颗粒。



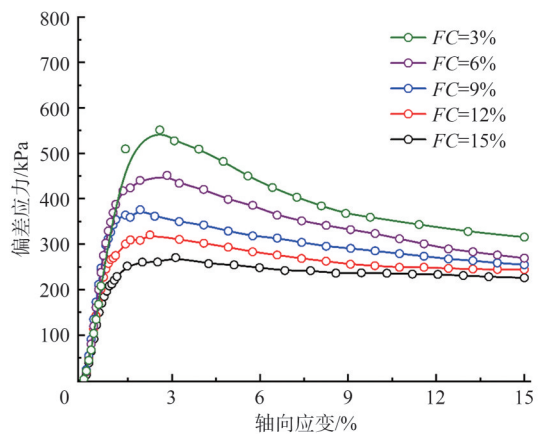
(a) $\sigma_3=30$ kPa, $\psi_0=5$ kPa



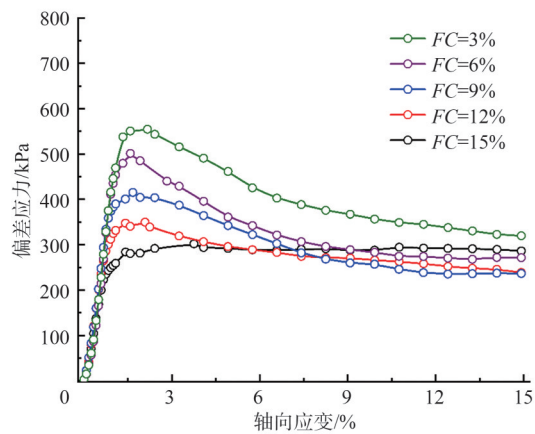
(b) $\sigma_3=30$ kPa, $\psi_0=10$ kPa



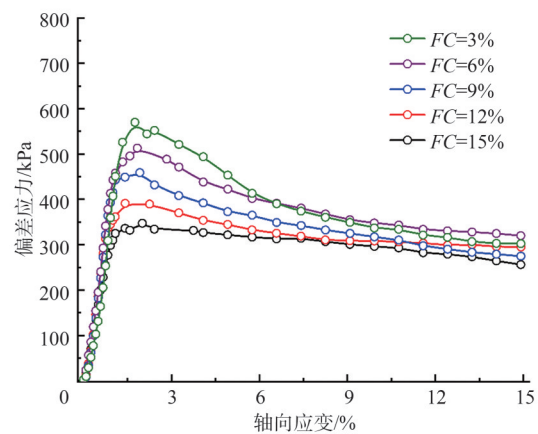
(c) $\sigma_3=30$ kPa, $\psi_0=20$ kPa



(d) $\sigma_3=60$ kPa, $\psi_0=5$ kPa



(e) $\sigma_3=60$ kPa, $\psi_0=10$ kPa



(f) $\sigma_3=60$ kPa, $\psi_0=20$ kPa

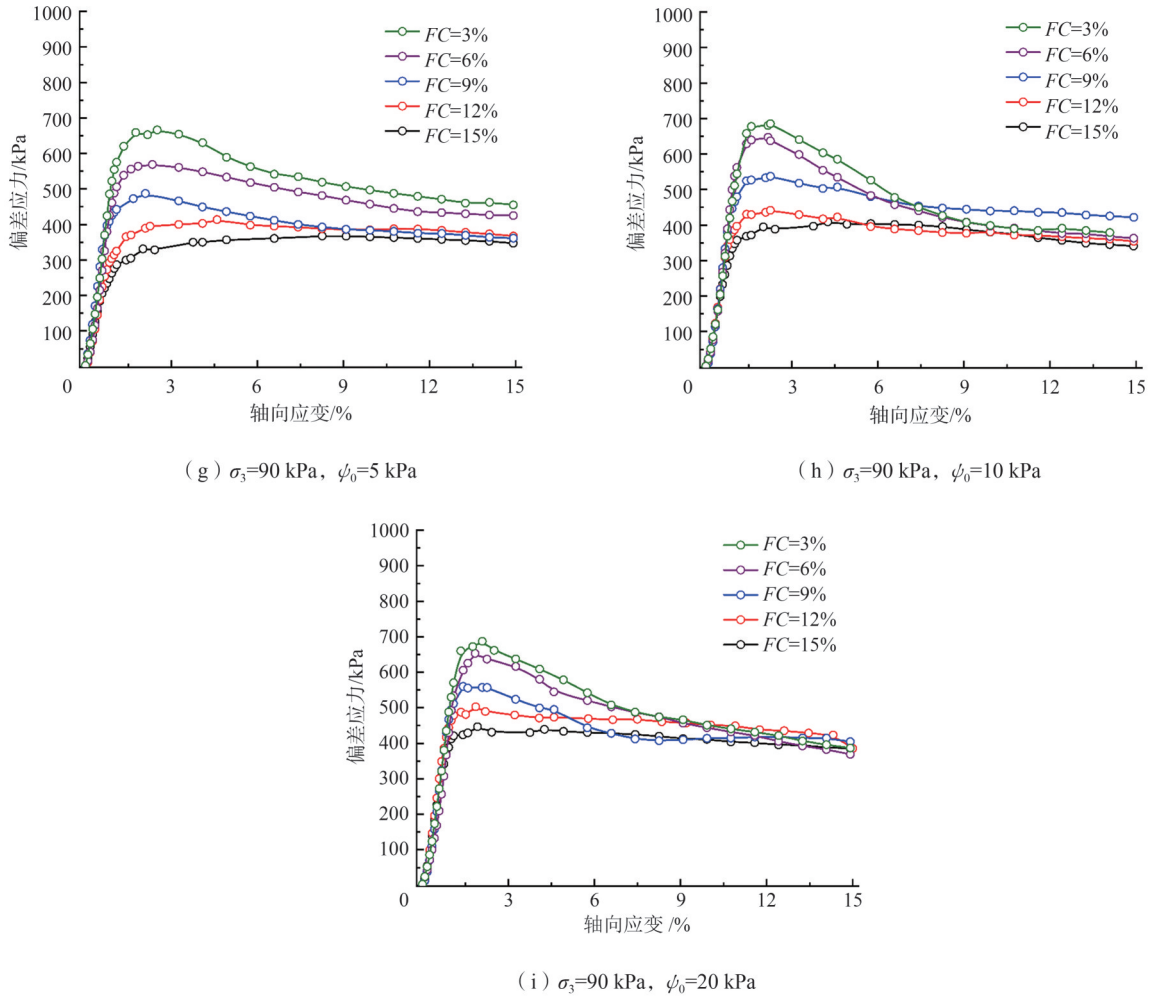
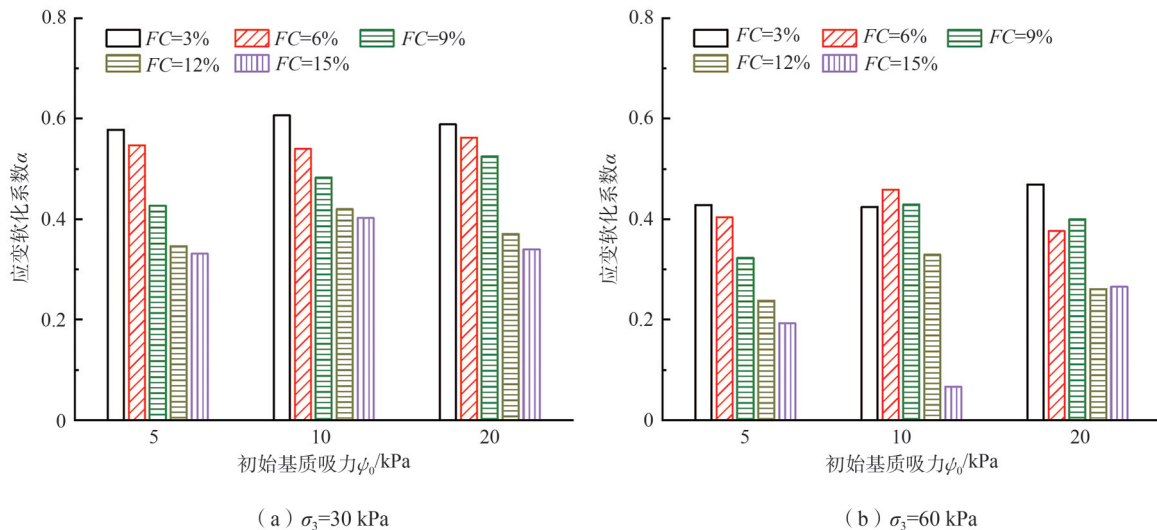


图4 不同细颗粒含量下粗粒土试样偏差应力-轴向应变关系

Fig. 4 Relationship between deviatoric stress and axial strain of coarse-grained soil at different fine contents

由于本研究中细颗粒的形状较为圆滑,在颗粒运动中起到了润滑作用,使得粗粒土试样强度达到峰值后有较大的衰减程度。但随着细颗粒含量的增加,这种润滑作用逐渐被抵消,因此导致粗粒土的应变软化现象不明显。



(a) $\sigma_3=30 \text{ kPa}$

(b) $\sigma_3=60 \text{ kPa}$

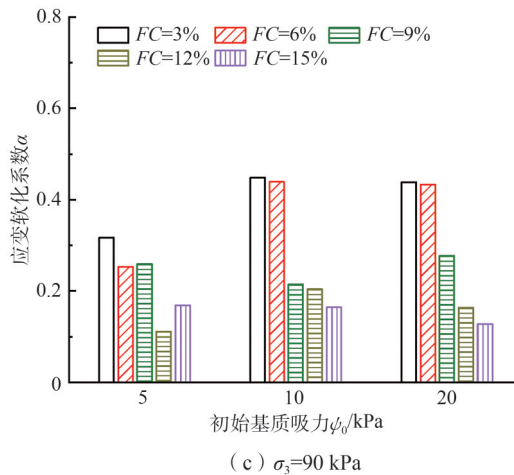


图5 不同细颗粒含量和初始基质吸力下粗粒土的应变软化系数

Fig. 5 Strain softening coefficients of coarse-grained soil under different fine contents and initial matrix suction

2.2.2 峰值强度

图6展示了峰值强度与细颗粒含量之间的关系。从图6中可观察到细颗粒含量和初始基质吸力对粗粒土峰值强度的影响。对于相同细颗粒含量的粗粒土试样,初始基质吸力的增加会导致其峰值强度的提升。这是因为增加的初始基质吸力会增强土颗粒之间的黏结力,从而提高粗粒土的峰值强度。例如,在细颗粒含量为3%的粗粒土试样中,在30 kPa围压下,随着初始基质吸力从5 kPa增加到20 kPa,试样的峰值强度从327 kPa增加至396 kPa,增幅达到21.1%。

对于相同初始基质吸力的粗粒土试样,细颗粒含量的增加会导致峰值强度的降低。这是因为细颗粒含量虽然增加,而粗粒土试样的干密度保持不变,使得粗颗粒含量减少,从而试样的峰值强度降低。例如,在5 kPa初始基质吸力和30 kPa围压条件下,当细颗粒含量从3%增加至15%时,试样的峰值强度从327 kPa下降至172 kPa,降幅达到47.4%。此外,从图6中可以看出,试样的峰值强度与细颗粒含量之间呈现出近乎线性的负相关关系,更加表明细颗粒含量对粗粒土试样峰值强度的影响显著。

2.2.3 抗剪强度

基于摩尔-库仑强度准则,本文对三轴试验得到的峰值应力绘制了摩尔应力圆,并进行最佳拟合。抗剪强度参数内摩擦角与黏聚力相对于细颗粒含量的关系曲线如图7所示。在试验测定的细颗粒含量和初始基质吸力范围内,试样的内摩擦角和黏聚力随着细颗粒含量的增加,呈现出不同的变化规律。

内摩擦角与细颗粒含量的关系曲线如图7(a)所示。由于在不同初始基质吸力条件下,相同细颗粒含量的试样内摩擦角相近,这与文献[21]中的试验结论一致,因此在图7(a)中采用了内摩擦角的平均值,未绘制不同初始基质吸力下内摩擦角的差异。从图7(a)可以看出,随着细颗粒含量的增加,内摩擦角整体呈下降趋势,这与文献[10]中结论相反,是粗粒土试样的含水状态不同导致的,本研究中粗粒土试样为非饱和状态,而文献[10]中粗粒土试样为饱和状态。值得注意的是,当细颗粒含量小于6%时,内摩擦角下降较为平缓;而当细颗粒含量大于6%时,下降速度明显加快。

黏聚力与细颗粒含量的关系曲线如图7(b)所示。随着细颗粒含量的增加,黏聚力同样整体呈下降趋势。但值得注意的是,当细颗粒含量小于9%时,黏聚力迅速下降;而当细颗粒含量超过9%时,黏聚力逐渐趋于稳定。此外,在图7(b)中也可以观察到,对于相同细颗粒含量的试样,黏聚力随着初始基质吸力的增加而增加。

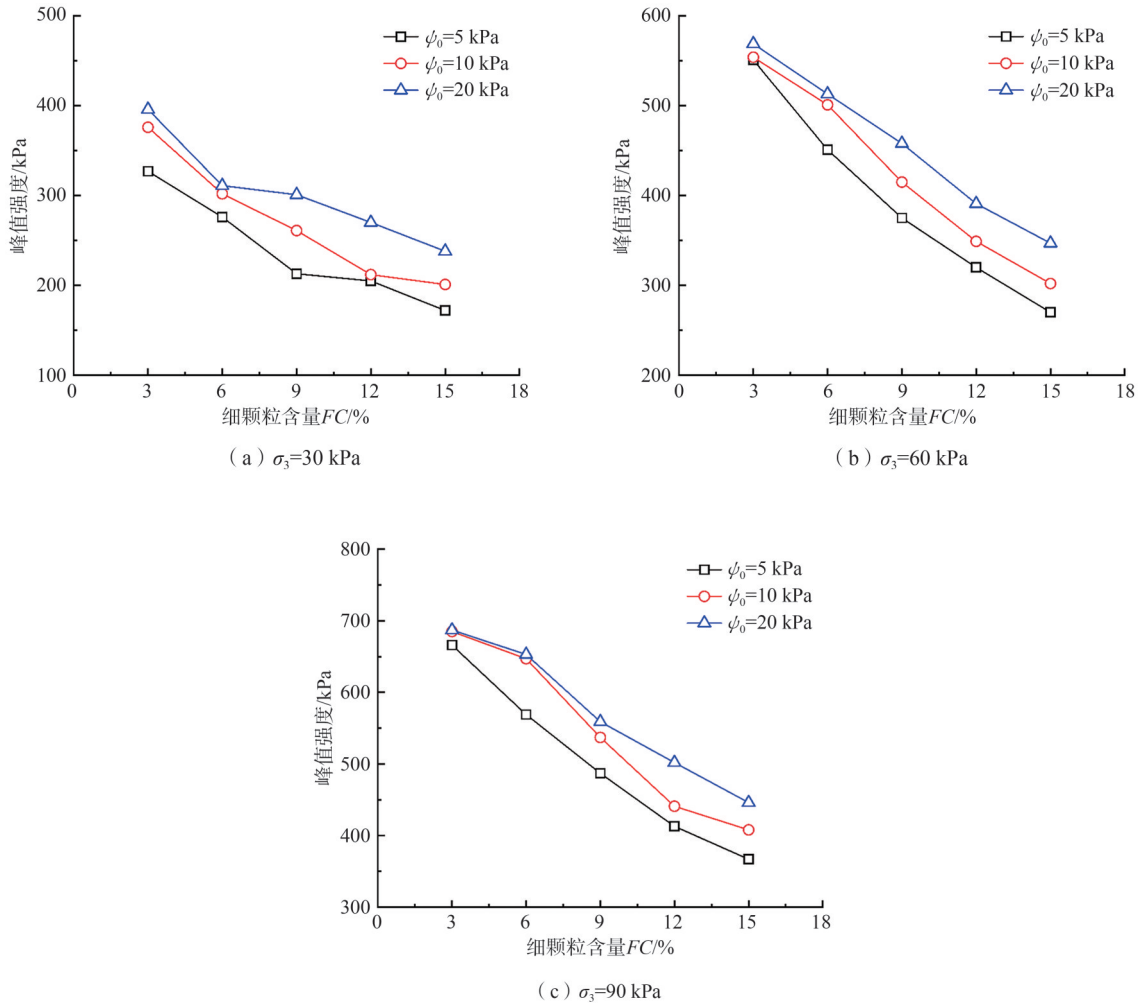


图6 峰值强度与细颗粒含量之间的关系

Fig. 6 Relationship between peak strength and fine contents

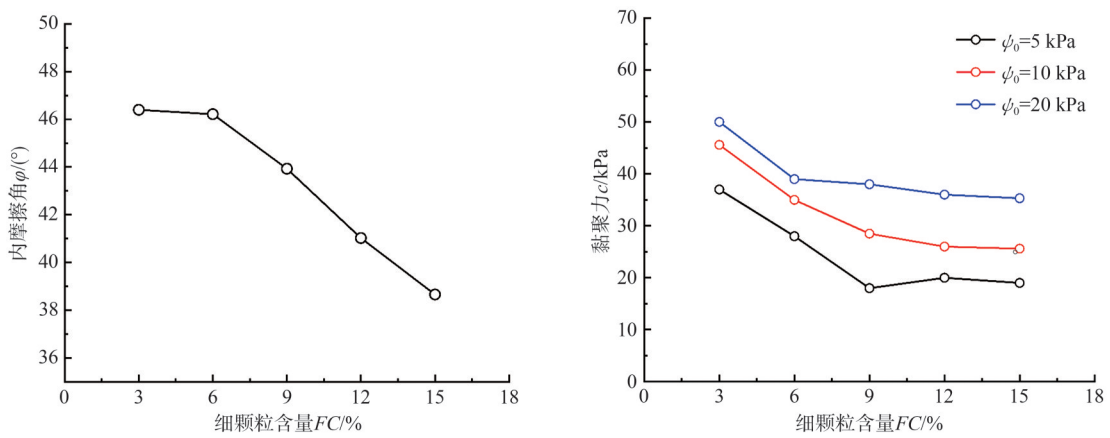


图7 抗剪强度参数与细颗粒含量的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between shear strength parameters and fine contents

3 结论

本文对5种细颗粒含量路基粗粒土填料进行了土水特征曲线测试和三轴剪切试验,主要分析了

非饱和状态下细颗粒含量和初始基质吸力对粗粒土力学性质的影响。主要结论如下:

(1) 在相同细颗粒含量下,粗粒土试样的基质吸力随体积含水率的增加而降低。而在同一体积含水率下,随着细颗粒含量的增加,粗粒土试样的基质吸力增大。其原因在于细颗粒具有更大的比表面积,能够更有效地吸附水分。

(2) 本研究中5种细颗粒含量的粗粒土试样均呈现应变软化性,在相同的围压和初始基质吸力条件下,随着细颗粒含量的增加,应变软化系数整体呈现下降趋势。

(3) 在相同细颗粒含量下,粗粒土试样的峰值强度随着初始基质吸力的增加而增大。而对于具有相同初始基质吸力的粗粒土试样,随着细颗粒含量的增加,试样的峰值强度减小。并且试样的峰值强度与细颗粒含量之间呈现出近乎线性的负相关关系,表明细颗粒含量对试样峰值强度的影响显著。

(4) 粗粒土抗剪强度受细颗粒含量和初始基质吸力的共同影响。随细颗粒含量增加,内摩擦角和黏聚力均减小。但内摩擦角和黏聚力减小的发展趋势并不相同,内摩擦角表现为先平缓下降后急剧减小,而黏聚力表现为先急剧下降后趋于平稳。

参考文献:

- [1] TENNAKOON N, INDRARATNA B. Behaviour of clay-fouled ballast under cyclic loading[J]. Géotechnique, 2014, 64(6): 502-506.
- [2] EBRAHIMI A, TINJUM J M, EDIL T B. Deformational behavior of fouled railway ballast[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(3): 344-355.
- [3] CUI X H, LING X. Effects of differential subgrade settlement on damage distribution and mechanical properties of CRTS II slab track[J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121821.
- [4] LIU W Q, ZHOU H M, WANG B S, et al. A subgrade cracking monitoring sensor based on optical fiber sensing technique[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(9): e2213.
- [5] 于艳春, 毕佳俊, 李高升, 等. 路基初始含水率对多年冻土路基水热特征及冻胀变形的影响研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 105-112.
- [6] 张宏, 王智远, 程昊, 等. 寒旱区隧道出入口路桥过渡段路面病害成因机理[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 435-440.
- [7] TENNAKOON N, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, et al. The role of ballast-fouling characteristics on the drainage capacity of rail substructure[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(4): 629-640.
- [8] INDRARATNA B, TENNAKOON N, NIMBALKAR S, et al. Behaviour of clay-fouled ballast under drained tri-axial testing[J]. Géotechnique, 2013, 63(5): 410-419.
- [9] 亓帅. 循环荷载下高铁路基粗-细粒混合料力学特性[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [10] 凌华, 傅华, 韩华强. 粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 12-16.
- [11] CHEN X B, ZHANG J S. Effect of clay invasion on shear behavior and dilatancy of unbound aggregate subbase[J]. Transportation Geotechnics, 2016, 6: 16-25.
- [12] 赵明志, 邓龙翔, 刘钢, 等. 不同细粒含量高压密级配碎石力学特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1121-1130.
- [13] 李小梅, 关云飞, 凌华, 等. 考虑级配影响的堆石料强度与变形特性[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 32-39.
- [14] 赵莉. 不同荷载频率与细粒含量下路基粗粒填料动力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [15] 唐栋, 李典庆, 金浩飞, 等. 国产“双圈”牌滤纸吸力率定曲线研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(1): 1-8, 53.
- [16] GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [17] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evapo-

- ration from a water table[J]. *Soil Science*, 1958, 85(4):228-232.
- [18] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4):521-532.
- [19] 刘雨, 陈俊桦, 朱自强. 水泥改良泥质板岩粗粒土的静力特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(1):139-145.
- [20] 李灿, 周海清, 宋强辉, 等. 考虑时间效应的人工制备结构性土应变软化特性影响研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2018, 32(10):110-115.
- [21] 朱秋雷, 韩爱果, 任光明. 不同含水率下细粒含量不同对土的抗剪强度的影响[J]. *天津理工大学学报*, 2018, 34(5):46-51.

(责任编辑 徐湘田)

Research on Static Triaxial Test of Unsaturated Coarse-Grained Soil Fill in Roadbed with Different Fine Contents

WU Zhifeng, CUI Kai, LI Qionglin

(*School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

Abstract: Coarse-grained soil is commonly used as fill material for subbase and base layers in road construction, and its mechanical properties are crucial for the service performance of the entire roadbed structure. To investigate the effects of fine content and initial matric suction on the mechanical properties of unsaturated coarse-grained soil, this study conducted soil-water characteristic curve tests and undrained triaxial tests under different matric suctions on five types of coarse-grained soil with varying fine content. The test results indicate that the soil-water characteristic curves of coarse-grained soil are influenced by the fine content. At the same volumetric water content, specimens with higher fine content exhibit greater matric suction. Under the same initial matric suction, as the fine content increases, the degree of strain softening in coarse-grained soil gradually decreases, while the peak strength experiences a rapid decline. Both the internal friction angle and cohesion of the shear strength parameters show a downward trend. Specifically, the internal friction angle decreases slowly until the fine content reaches 6%, after which it drops sharply. Meanwhile, the cohesion initially decreases rapidly and becomes relatively stable after the fine content reaches 9%. These findings provide technical guidance for the design and stability assessment of coarse-grained soil embankments in road construction.

Key words: coarse-grained soil; fine content; initial matrix suction; shear strength