

粗颗粒含量对非饱和混合土强度与 变形特性影响的试验研究*

秦卫军^{1,2}, 潘伟³, 李琼林³, 王书娟^{1,2}

(1. 吉林省交通科学研究所, 长春 130012; 2. 季节性冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 长春 130012; 3. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要:以G331公路吉林段沿线山区崩积坡体中非饱和混合土为研究对象,通过系统开展静力三轴试验,分析不同粗颗粒含量混合土的强度和变形特性。结果表明,在高含水量、高粗颗粒含量及低围压条件下,混合土的应力-应变曲线易发展为应变软化型。随着含水量的增加,混合土的峰值偏应力逐渐减小;而粗颗粒含量和围压的增加则导致峰值偏应力增大。对于相同粗颗粒含量的混合土,其内摩擦角和黏聚力均随含水量的增加而减小;此外,内摩擦角随着粗颗粒含量的增加而减小,而黏聚力则呈现先增加后减小的趋势。混合土的变形模量 E_{50} 随粗颗粒含量增加先迅速减小后缓慢增大,对于相同粗颗粒含量的混合土, E_{50} 随含水量的增加而逐渐减小,并随着围压的增加而增大。混合土的变形与强度特征主要受不同粗颗粒含量下骨架结构变化及不同含水量条件下基质吸力变化的影响。本研究的成果为非饱和混合土边坡的稳定性计算与评估提供了试验基础。

关键词:混合土;粗颗粒含量;应力-应变关系;强度参数

中图分类号:U416 **文献标志码:**A

近年来,我国交通基础设施建设向山区发展,沿线地质条件复杂,路侧坡体陡峭,在工程开挖、降雨以及地震等影响下易发生滑坡灾害,严重影响沿线交通基础设施的安全建设与运营。在山区公路交通沿线广泛分布着由粗细颗粒级配不连续的混合土构成的崩积边坡,其强度与变形特性受到级配特征的显著影响。此外,降雨、融雪及蒸发等气候因素导致边坡土体的含水量状态发生显著变化。因此,深入研究不同饱和状态下混合土的强度和变形特性,探究强度和变形参数随混合土级配特征和饱和状态的变化规律,对于评估混合土边坡的稳定性及进行边坡支护结构的设计具有重要意义。

鉴于工程实践需求,相关学者针对混合土的力学特性进行了大量的试验研究,结果表明颗粒级配是混合土的重要物理参数^[1-2],其通过影响土体的骨架结构,间接影响变形破坏机理及宏观力学特征。崔凯等^[3-5]针对川西地区混合土开展了直剪试验、循环三轴试验和压缩试验,揭示了粗颗粒含量对混合土抗剪强度、动强度参数和压缩特性的显著影响。付红梅^[6]针对西北地区混合土开展系统的固结压缩试验,发现随着混合土中粗颗粒含量的增加,土体压缩性降低。赵煜鑫等^[7]研究粗细混合土在不同饱和度下的强度演化规律,发现其强度变形特征与粗细颗粒含量比例密切相关,随着细颗粒含量的增加,土骨架由粗颗粒控制逐渐转变为细颗粒控制。石杰等^[8]通过3组不同细颗粒含量的混合土进

* 收稿日期:2025-05-07; 修回日期:2025-06-11

基金项目:吉林省交通运输创新发展支撑(科技)项目(2021-1-1)

作者简介:秦卫军(1981—),男,山东菏泽人,正高级工程师。主要从事公路路基路面及智能交通技术研究。

E-mail:65311621@qq.com

通信作者:李琼林(1986—),男,山东肥城人,教授,博士。主要从事极端冻融环境岩土工程灾害防控技术研究。

E-mail:qionglin_li@126.com

行三轴压缩试验,分析了细颗粒含量对混合土的应力-应变关系和变形特性的影响。邬智峰等^[9]研究了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。刘恩龙等^[10]通过循环三轴试验研究了粗颗粒和细颗粒含量对混合土动强度的影响,发现混合土的动强度随着细颗粒含量的增加呈现先降低后增加的趋势。冯瑞玲等^[11]以不同级配的含粗颗粒的细粒土为研究对象,进行了大量的室内击实试验,得出含粗颗粒的细粒土的最大干密度与各粒组含量之间存在良好的线性关系。禹贵香等^[12]针对粗细颗粒混合土试样,开展室内击实试验以分析不同粗细颗粒掺量下混合土试样的压实特性。

尽管目前已有大量关于混合土的研究,但鉴于其在工程应用中的重要性,仍需深入探讨其变形与强度特性。考虑到边坡坡体中的混合土通常处于非饱和状态,且其饱和度随季节和气候变化而动态波动,因此,准确评估混合土边坡的稳定性需要掌握其在不同饱和状态下的变形与强度特性。基于此,本文以 G331 公路沿线山区崩积坡体的混合土为研究对象,综合考虑含水量和粗颗粒含量对其变形与强度特性的影响,对 8 种不同粗颗粒含量的非饱和混合土系统开展静力三轴剪切试验。研究结果揭示了粗颗粒含量与含水量对混合土强度和变形参数的影响,可为混合土边坡稳定性评估提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自 G331 公路吉林段沿线山区崩积坡体的混合土,将土样烘干碾碎后进行筛分,剔除土样中粒径大于 10 mm 的粒组,得到原始土样颗粒级配曲线,如图 1 所示。本次试验将土样以土粒粒径 2 mm 作为界限分为两组,按大于 2 mm 的不同粗颗粒含量配成 8 种粗细混合土,即大于 2 mm 粗颗粒含量为 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%,8 种土样颗粒级配曲线如图 1 所示,原始颗粒级配与粗颗粒含量为 30% 的土样颗粒级配接近。由颗粒级配曲线计算得到的不均匀系数和曲率系数如表 1 所示,8 种土样的不均匀系数均大于 5,且曲率系数均在 1~3 内,8 种土样均级配良好。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)中击实试验规定,对各土样开展击实试验,得到各土样的最优含水量和最大干密度如表 1 所示。

基质吸力对非饱和土的抗剪强度有重要影响,在进行静三轴试验之前,采用滤纸法测定 8 种粗颗粒含量土样的土-水特征曲线。滤纸法试验选用杭州“双圈”品牌的 No. 203 型滤纸,根据唐栋等^[13]对此类型滤纸所得到的基质吸力率定方程,得到混合土的基质吸力,绘制土-水特征曲线见图 2。

1.2 试验方法

试样制备按《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)推荐的制样方法,采用分层击实法分 5 层制样,最终制得直径 100 mm、高 200 mm 的圆柱体试样。根据不同混合土的最

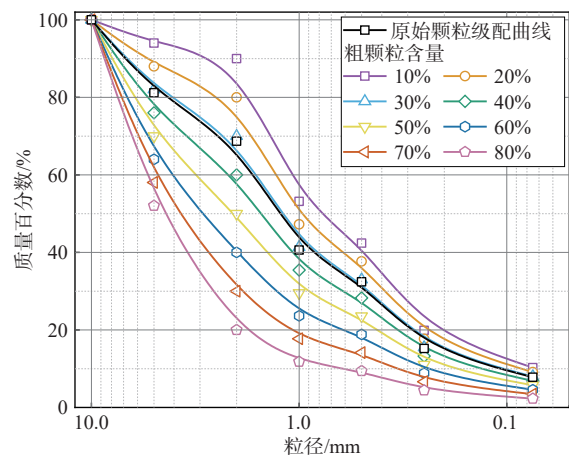


图 1 不同级配下试样颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curves of samples under different gradations

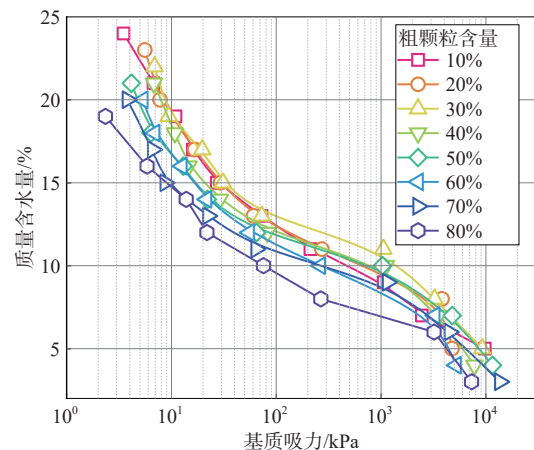


图 2 土-水特征曲线

Fig. 2 Soil-water characteristic curves

优含水量(表1)对每种混合土样设置3种含水量,制样时控制每个试样的干密度均为 1.6 g/cm^3 ,设置3种围压为100、200和300 kPa,具体试验方案如表2所示。

表1 各级配试样的不均匀系数、曲率系数、最优含水量和最大干密度

Table 1 Inhomogeneity coefficient, curvature coefficient, optimal moisture content and maximum dry density of the samples at different gradation levels

粗颗粒含量/%	最优含水量/%	最大干密度/(g/cm^3)	不均匀系数	曲率系数
10	12.9	1.88	15.44	1.50
20	12.3	1.92	15.26	1.37
30	11.7	1.93	16.25	1.33
40	11.2	1.94	16.88	1.31
50	10.8	1.95	18.39	1.51
60	10.2	1.96	17.28	1.77
70	9.8	1.98	14.37	2.20
80	9.3	2.00	8.96	2.08

表2 三轴剪切试验方案

Table 2 Triaxial shear test protocol

组号	粗颗粒含量/%	围压/kPa	含水量/%	组号	粗颗粒含量/%	围压/kPa	含水量/%
1	10	100	11、12、13	5	50	100	10、11、12
		200	9、10、11			200	9、10、11
		300	9、10、11			300	9、10、11
2	20	100	11、12、13	6	60	100	9、10、11
		200	9、10、11			200	9、10、11
		300	9、10、11			300	9、10、11
3	30	100	11、12、13	7	70	100	9、10、11
		200	9、10、11			200	9、10、11
		300	9、10、11			300	9、10、11
4	40	100	10、11、12	8	80	100	9、10、11
		200	9、10、11			200	9、10、11
		300	9、10、11			300	9、10、11

三轴试验设备为KTL静动三轴试验系统,如图3所示,试验设备主要由电机伺服的轴向加载主机、体积压力控制器、压力室、控制器、数据采集系统以及控制软件组成。可通过试验控制软件预定义实验步骤,全自动执行实验过程,并根据预设的终止条件停止加载。本试验首先对试样施加预定的各向同性压力,达到预定围压后,稳定15 min,然后以轴向应变控制方式施加轴向荷载,加载速率为 $1\%/min$,当轴向应变达到20%时停止加载。试验过程中排水阀保持关闭状态,保证试样的含水量不变,因此,试验仅控制了混合土初始基质吸力的不同,并未对加载过程中的基质吸力进行控制。

2 偏应力-应变关系

2.1 粗颗粒含量和围压的影响

含水量为11%时不同粗颗粒含量混合土的偏应力-应变曲线如图4所示,围压为100 kPa时,

见图 4(a),粗颗粒含量为 10%、20%、30%、40%、50% 和 60% 的混合土试样,其偏应力-应变曲线在加载初期迅速增大,随着轴向应变进一步增大,偏应力增长速率逐渐减缓,曲线整体呈现出应变硬化的特征;对于粗颗粒含量为 70% 和 80% 的混合土试样,偏应力-应变曲线在加载初期同样呈现快速增长,随后迅速达到峰值,然后偏应力随着轴向应变的增大逐渐减小,最终趋于平缓,曲线整体呈现应变软化的特征。围压为 200 kPa 时,见图 4(b),只有粗颗粒含量为 80% 的混合土试样的偏应力-应变曲线为软化型,其他粗颗粒含量的偏应力-应变曲线均为硬化型;当围压为 300 kPa 时,见图 4(c),试验中所涉及的所有粗颗粒含量混合土的偏应力-应变曲线均表现为应变硬化型。总体来看,偏应力-应变曲线随着围压增大而逐渐由应变软化型向应变硬化型过渡^[14-15],且同一围压下,高粗颗粒含量混合土的偏应力-应变曲线易出现应变软化现象。此外,从图 4 可以看出,在同一围压下,土样在相同的轴向应变对应的偏应力整体上呈现出随粗颗粒含量的增加而减小的趋势,但在同一含水量和粗颗粒含量下,土样在相同轴向应变对应的偏应力随围压增加而逐渐增加^[14]。



图 3 KTL 静动三轴试验系统

Fig. 3 KTL static and dynamic triaxial testing system

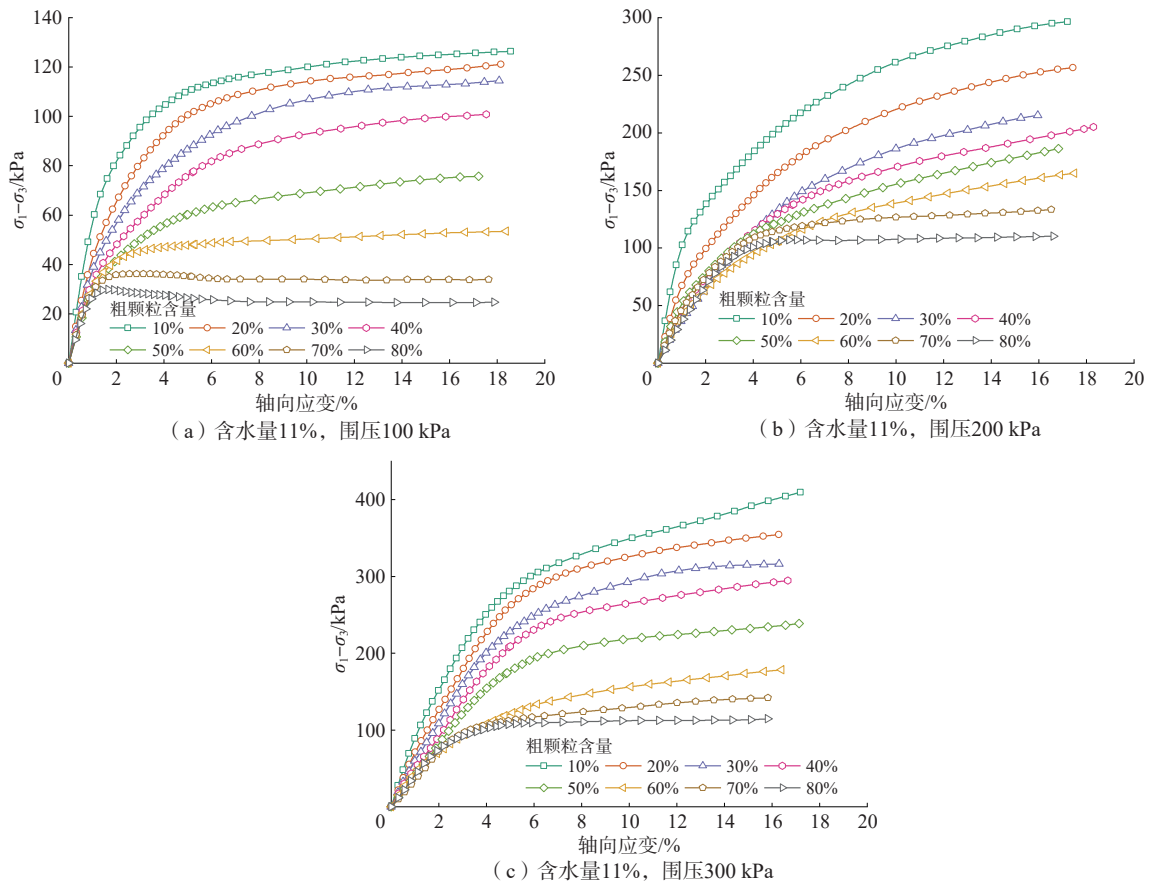


图 4 偏应力-应变曲线随粗颗粒含量变化情况

Fig. 4 Relationship between deviation stress-strain curve and coarse particle content

一方面,试样内部颗粒间的咬合能力随着围压增加而逐渐增大,围压为 300 kPa 的试样比围压为 100 kPa 和 200 kPa 的试样颗粒嵌挤压力大,试样内部裂隙的贯通受到抑制,最终致使试样偏应力-应变曲线由应变软化型逐渐向应变硬化型过渡,且产生同一轴向应变所需的偏应力逐渐增加。另一方面,混合土的偏应力-应变关系受到粗颗粒含量的显著影响。混合土的粗细颗粒比例决定了土体的骨架结构^[16],随着粗颗粒含量的增加,土体骨架逐渐从细粒控制转变为粗粒控制,粗颗粒含量较少时,粗细混合土的土体骨架由细粒组成,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,土体粗细颗粒咬合较好,随着粗颗粒含量增加,混合土的土体骨架逐渐转为细粒填充在粗粒间的骨架-孔隙型^[7],即粗颗粒含量越高,土体结构越疏松,土体颗粒间咬合变差,试样的偏应力越低,致使试样偏应力-应变曲线由应变硬化型逐渐发展为应变软化型,且产生同一轴向应变所需的偏应力逐渐减小。

2.2 混合土含水量的影响

图 5 为围压 200 kPa 时,粗颗粒含量为 10%、40%、60%、80% 的混合土偏应力-应变曲线,由图 5 可知,在不同粗颗粒含量条件下,土样在相同的轴向应变对应的偏应力随含水量的增加均逐渐减小。值得注意的是,在粗颗粒含量为 80%、含水量为 11% 时,偏应力-应变曲线发展为应变软化型。一方面是因为水的润滑作用降低了颗粒间的摩擦因素^[17],从而降低了颗粒间的咬合作用及颗粒的抗转动能力,使得高含水量试样表现出更低的抗剪强度。另一方面是因为非饱和土随饱和度降低,土体中的基质吸力增大从而提高了抗剪强度^[18],如图 2 所示,相同粗颗粒含量混合土试样中,含水量越高,基质吸力越低,抗剪强度越低,使试样偏应力-应变曲线在高含水量条件下更易发展为应变软化型,且产生同一轴向应变所需偏应力逐渐减小。结合粗颗粒含量和围压对偏应力-应变曲线的影响分析,在高粗颗粒含量、高含水量和低围压条件下,偏应力-应变曲线易出现应变软化现象。

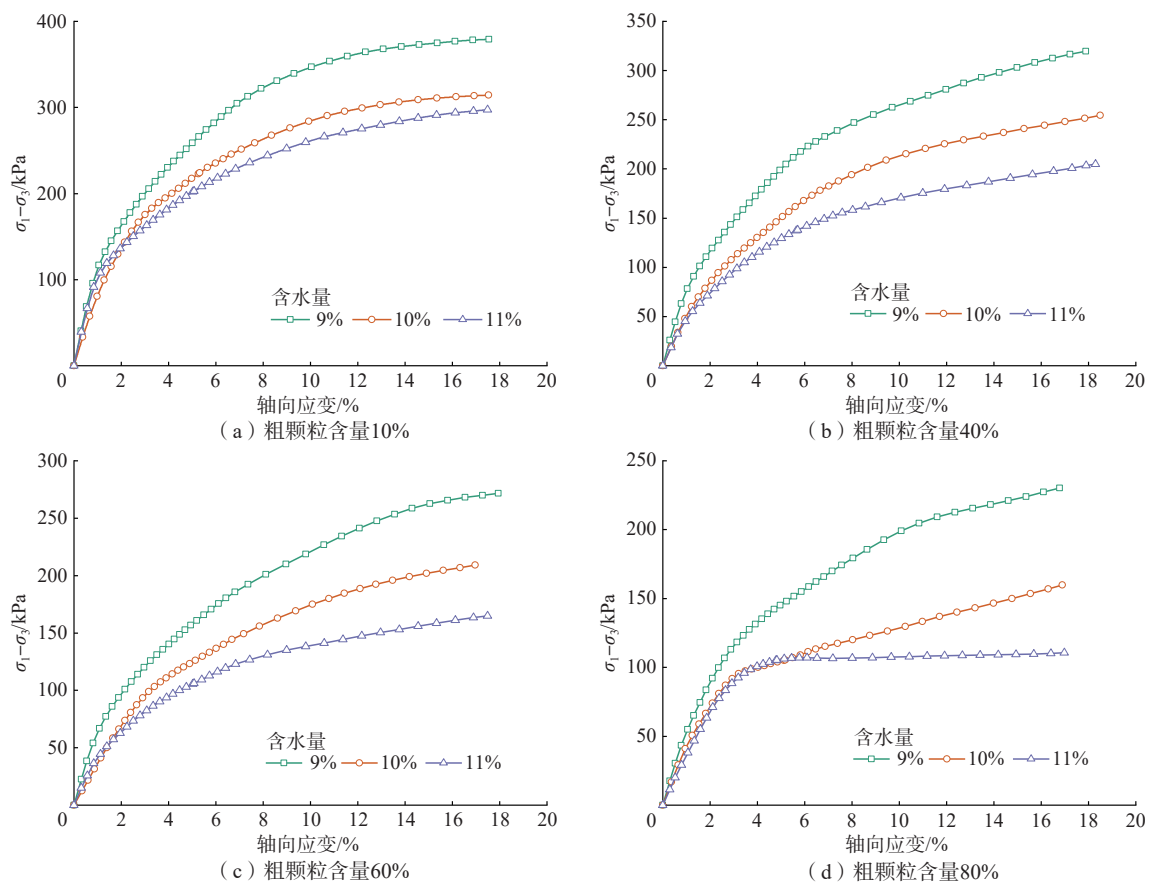


图 5 200 kPa 围压条件下偏应力-应变曲线随含水量变化情况

Fig. 5 Variation of deviatoric stress-strain curve with water content under 200 kPa confining pressure

3 强度与变形参数的分析

3.1 抗剪强度和抗剪强度参数

3.1.1 抗剪强度

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)的规定,对于应变软化型曲线,其偏应力峰值为试样的抗剪强度;对于应变硬化型曲线,取轴向应变为15%时对应的偏应力为抗剪强度。含水量为11%时,不同围压条件下抗剪强度随粗颗粒含量的变化如图6所示。由图6可知,围压和含水量不变,抗剪强度随着粗颗粒含量的增加而逐渐减小,这是因为随着粗颗粒含量增加,混合土的土体骨架逐渐由粗粒悬浮于细粒间的骨架-悬浮型转为细粒填充在粗粒间的骨架-孔隙型^[7],即粗颗粒增多导致孔隙比增大^[4],土体颗粒间咬合变弱,土体的抗剪强度降低。含水量和粗颗粒含量相同时,抗剪强度随着围压增加而逐渐增大。围压为200 kPa,粗颗粒含量为10%、40%、60%、80%时,抗剪强度随含水量的变化如图7所示。由图7可知,围压和粗颗粒含量不变,抗剪强度随着含水量的增加而逐渐减小。这是因为含水量越高,饱和度越高,基质吸力减小,且水对土颗粒的润滑作用增强,导致摩擦因素降低,抗剪强度减小。

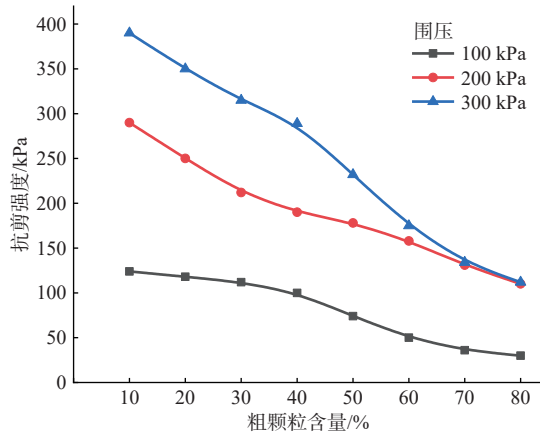


图6 抗剪强度与粗颗粒含量关系

Fig. 6 Relationship between shear strength and coarse particle content

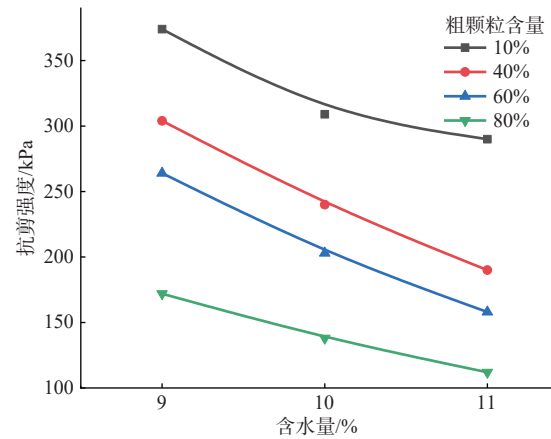


图7 抗剪强度与含水量关系

Fig. 7 Relationship between shear strength and water content

3.1.2 抗剪强度参数

取含水量为11%时,不同围压条件下相同粗颗粒含量试样的应力-应变测试结果,按照陈立宏等^[19]提出的三轴实验数据处理方法,得到各粗颗粒含量混合土的抗剪强度指标。混合土样抗剪强度指标(内摩擦角和黏聚力)随粗颗粒含量的变化情况如图8、图9所示。

(1) 随着试样中粗颗粒含量的增大,内摩擦角呈减小趋势,见图8。试样总含水量不变,随着试样内粗颗粒含量的增加,贮存于粗颗粒孔隙中的含水量增加,对颗粒间的润滑作用增强,故随着粗颗粒含量的增加,混合土样颗粒间的摩擦因素降低,内摩擦角逐渐降低。

(2) 随着试样中粗颗粒含量的增大,黏聚力先增大后减小,见图9。土的黏聚力受颗粒间胶结、基质吸力、静电引力和范德华力等影响^[20]。根据扈胜霞等^[21]的试验结果显示,非饱和原状黄土中,基质吸力对其有效内摩擦角影响不大,对黏聚力影响显著,表现为基质吸力越大,黏聚力越大。由土-水特征曲线(图2)可知,当混合土质量含水量为11%时,粗颗粒含量为30%的混合土基质吸力最大,对黏聚力的影响较大,且粗颗粒含量30%相比10%时有所增加,细颗粒能更好地填充粗颗粒间的孔隙,粗细颗粒的接触面增大,粗细颗粒间的胶结作用变强,黏聚力增加,随着粗颗粒含量的持续增加,这种胶结作用的影响减弱,对黏聚力的影响逐渐降低,故出现了随粗颗粒含量的增大,黏聚力先增大后减小的现象。

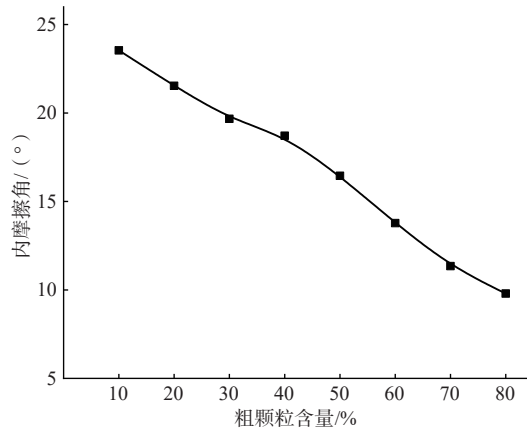


图8 内摩擦角与粗颗粒含量关系

Fig. 8 Relationship between internal friction angle and coarse particle content

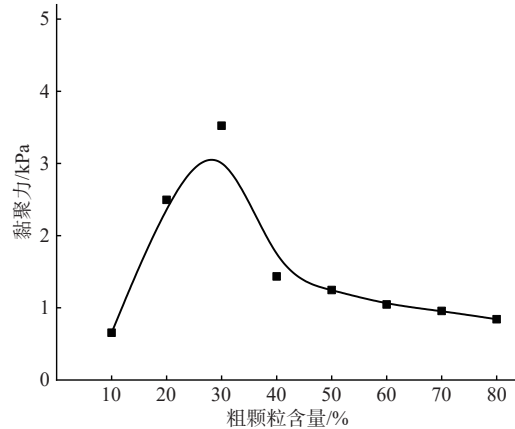


图9 黏聚力与粗颗粒含量关系

Fig. 9 Relationship between cohesion and coarse particle content

控制混合土粗颗粒含量不变,取不同围压条件下相同含水量试样的应力-应变测试结果,得出混合土强度指标随含水量的变化情况如图10、图11所示。

(1) 随着混合土含水量的增大,内摩擦角逐渐减小,如图10所示。

(2) 随着混合土含水量的增大,黏聚力亦呈减小趋势,如图11所示。这是由于水的润滑作用降低了颗粒间的摩擦因素^[18],从而减小了试样的抗剪强度参数。

抗剪强度参数的变化对边坡稳定性有重要影响,研究抗剪强度参数随粗颗粒含量和含水量的变化规律,可为进行非饱和混合土边坡稳定性分析奠定试验基础。

3.2 变形模量 E_{50}

采用变形模量 E_{50} (偏应力-应变曲线中峰值偏应力的50%所对应的割线模量)来表征混合土抵抗变形的能力。含水量为11%时,不同围压条件下 E_{50} 随粗颗粒含量的变化如图12所示, E_{50} 随粗颗粒含量增加先急剧减小后缓慢增大,可见粗颗粒含量较低时,土体骨架主要由细颗粒控制,颗粒间接触面较大,混合土抵抗变形的能力较强。随着粗颗粒含量增加,土体抵抗变形的能力不断降低,经过粗颗粒含量为40%至60%的过渡后,继续增加粗颗粒含量,土体骨架转变为由粗颗粒控制,因粗粒土较坚硬,土体抵抗变形的能力有所增加。随着围压增大,变形模量 E_{50} 整体呈增大趋势,可见土体颗粒随着围压的增加接触更紧密,抵抗变形的能力增强。围压为200 kPa,粗颗粒含量为10%、40%、60%、80%时, E_{50} 随着含水量

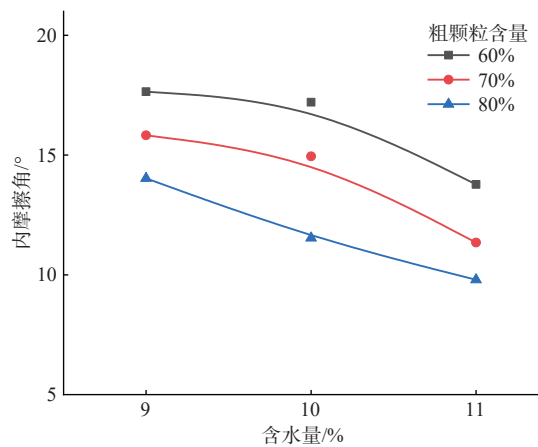


图10 内摩擦角与含水量关系图

Fig. 10 Relationship between internal friction angle and moisture content

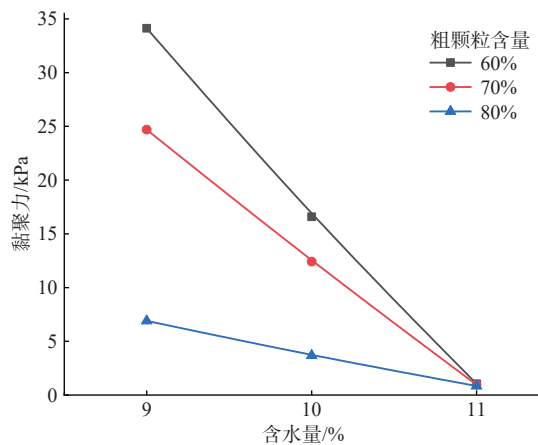
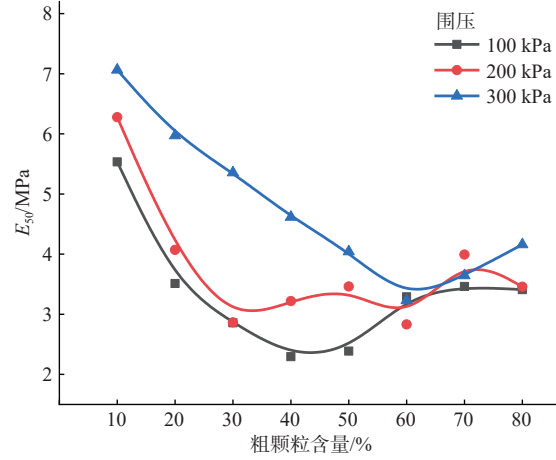
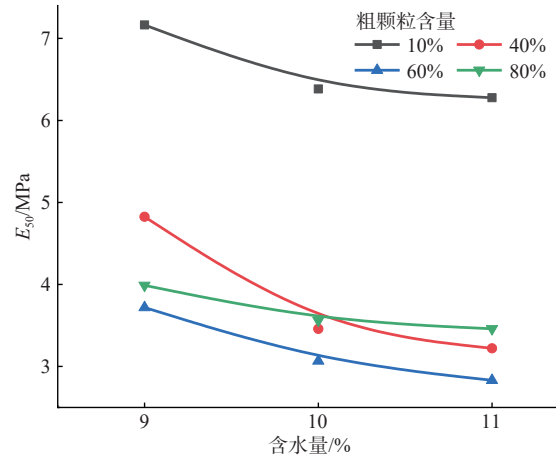


图11 黏聚力与含水量关系

Fig. 11 Relationship between cohesion and moisture content

的变化如图 13 所示,随着含水量增加 E_{50} 逐渐减小,可见,混合土含水量越高,土体抵抗变形的能力越弱。变形模量 E_{50} 是反映边坡稳定性和变形的重要指标,在边坡工程中,可以根据 E_{50} 随着粗颗粒含量和含水量的变化趋势,评价边坡土体抵抗变形的能力,为边坡防治提供参考依据。

图 12 E_{50} 与粗颗粒含量关系Fig. 12 Relationship between E_{50} and coarse particle content图 13 E_{50} 与含水量关系Fig. 13 Relationship between E_{50} and water content

4 结论

本文针对不同粗颗粒含量的非饱和混合土开展静力三轴剪切试验,系统研究了粗颗粒含量和含水量对混合土变形与强度特性的影响,得到以下主要结论。

(1) 围压和含水量不变的条件下,粗颗粒含量越高,土体骨架结构越疏松,混合土峰值偏应力越低;围压和粗颗粒含量不变的条件下,含水量越高,基质吸力越低,润滑作用越强,混合土峰值偏应力越低。

(2) 混合土试样的围压、含水量和粗颗粒含量对其偏应力-应变关系曲线具有综合影响,低围压、高含水量和高粗颗粒含量条件下,偏应力-应变曲线倾向于应变软化型。

(3) 非饱和混合土的内摩擦角和黏聚力均随着含水量增加而减小。内摩擦角随着粗颗粒含量增加而减小,黏聚力随着粗颗粒含量增加先增大后减小,当质量含水量为 11% 时,粗颗粒含量为 30% 的混合土基质吸力最大,此时的黏聚力也最大。

(4) 粗细混合土的变形模量 E_{50} 随着含水量增加而逐渐减小,随着围压增大而逐渐增大,随着粗颗粒含量增加先快速减小后缓慢增大,且在粗颗粒含量小于 30% 时衰减速率最为显著。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 崔凯, 苏磊. 粗颗粒含量对川西混合土抗剪强度的影响 [J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(4):778-785.
- [4] 崔凯, 荆祥. 地震荷载作用下粗颗粒含量对川西混合土动剪切模量和阻尼比的影响 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(12):123-131.
- [5] 崔凯, 秦晓同. 粗颗粒含量对川西地区混合土压缩特性的影响 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(2):59-66.
- [6] 付红梅. 西北地区混合土的固结试验研究 [J]. *甘肃科学学报*, 2015, 27(6):86-90.
- [7] 赵煜鑫, 张祿乾, 李旭, 等. 宽饱和度范围非饱和和粗细混合土的强度演化规律: 试验现象 [J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(11):2278-2288.
- [8] 石杰, 王毅, 樊殷莉, 等. 粗细粒混合土力学特性研究 [J]. *西北水电*, 2013(1):54-56.
- [9] 邬智峰, 崔凯, 李琼林. 不同细颗粒含量非饱和路基粗粒土填料静三轴试验研究 [J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2025, 56(4):415-424.
- [10] 刘恩龙, 宋长航, 罗开泰, 等. 粗-细粒混合土动力特性探讨 [J]. *世界地震工程*, 2010(S1):28-31.
- [11] 冯瑞玲, 陶建利, 赵占厂, 等. 含粗粒的细粒土的压实特性研究 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(2):382-386.
- [12] 禹贵香, 吴子龙. 冻融作用下粗细颗粒混合土无侧限抗压强度劣化规律与机理 [J]. *公路交通科技*, 2023, 40(6):41-46.
- [13] 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.
- [14] 黄超, 唐明扬, 张升, 等. 混合均匀度对粗粒土强度特性影响的试验研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(6):2175-2186.
- [15] 马付龙, 刘恩龙, 王丹, 等. 高温高含冰量冻结砂土的三轴压缩力学特性 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(7):124-131.
- [16] 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.
- [17] 黄林冲, 叶文, 赖正首. 考虑形态及含水率的颗粒材料尺寸效应室内三轴试验研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(9):2262-2270.
- [18] 闫亚景, 文宝萍, 计博勋. 基质吸力对非饱和重塑黄土抗剪强度的贡献 [J]. *工程地质学报*, 2011, 19(6):865-874.
- [19] 陈立宏, 唐松涛, 张洪涛. 常规三轴试验数据处理的电子表格法 [J]. *北京交通大学学报*, 2010, 34(1):54-57.

[20] 李广信. 论土骨架与渗透力[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8):1522-1528.

[21] 扈胜霞, 周云东, 陈正汉. 非饱和原状黄土强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4):660-663, 672.

(责任编辑 徐湘田)

Experimental Study on the Influence of Coarse Particle Content on the Strength and Deformation Characteristics of Unsaturated Mixed Soil

QIN Weijun^{1,2}, PAN Wei³, LI Qionglin³, WANG Shujuan^{1,2}

(1. *Jilin Provincial Transportation Science Research Institute, Changchun 130012, China;*

2. *Key Laboratory of Transportation Industry for Highway Construction and Maintenance
Technology in Seasonally Frozen Areas, Changchun 130012, China;*

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

Abstract: Unsaturated mixed soils from mountainous colluvial slopes along the Jilin section of the G331 Highway was investigated. Through systematic static triaxial tests, the strength and deformation properties of mixed soils with varying coarse particle contents were analyzed. The results show that under conditions of high water content, high coarse particle content, and low confining pressure, the stress-strain curves of the mixed soils tend to exhibit strain-softening behavior. With increasing water content, the peak deviatoric stress of the mixed soils gradually decreases, while increases in coarse particle content and confining pressure lead to increase in peak deviatoric stress. For mixed soils with the same coarse particle content, both the internal friction angle and cohesion decrease with increasing water content. Furthermore, the internal friction angle decreases with increasing coarse particle content, while cohesion initially increases and then decreases. The deformation modulus (E_{50}) of the mixed soils decreases rapidly and then increases slowly with increasing coarse particle content. For mixed soils with the same coarse particle content, the E_{50} decreases with increasing water content and increases with increasing confining pressure. The deformation and strength characteristics of mixed soil are mainly affected by the changes in the skeleton structure under different coarse particle contents and the changes in matrix suction under different water contents. The results of this study provide an experimental basis for the calculation and assessment of the stability of unsaturated mixed soil slopes.

Key words: mixed soil; coarse particle content; stress-strain relationship; strength parameter