

# 含石量对粗粒土力学特性影响的试验研究

朱凯飞<sup>1,2</sup>, 徐昂暄<sup>1,2</sup>, 宫浩林<sup>1,2</sup>, 姜兴基<sup>1,2</sup>, 陈 帅<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

<sup>2</sup>河南省岩土力学与结构工程重点实验室, 河南 郑州

收稿日期: 2024年9月9日; 录用日期: 2024年9月30日; 发布日期: 2024年10月12日

## 摘 要

粗粒土在自然界中分布广泛且在工程中应用普遍, 研究其力学特性具有重要意义。以原始土和添加30%碎石的改良土(碎石土)为研究对象, 通过室内大型三轴剪切试验, 研究提高含石量对粗粒土的抗剪强度和变形特性有何影响。试验结果表明: 添加30%碎石后, 粗粒土的透水能力增强, 达到相同固结程度, 所需时间更短; 原始土和碎石土应力-应变曲线均表现出应变硬化特性; 两种土的强度均随围压的增大而增大, 且相同围压下, 碎石土强度大于原始土, 并且围压越大, 差别越大; 添加碎石提高了粗粒土的内摩擦角, 但降低了粗粒土的黏聚力。

## 关键词

粗粒土, 大型三轴试验, 含石量, 力学特性

# An Experimental Study on the Influence of Rock Content on the Mechanical Properties of Coarse-Grained Soil

Kaifei Zhu<sup>1,2</sup>, Angxuan Xu<sup>1,2</sup>, Haolin Gong<sup>1,2</sup>, Xingji Jiang<sup>1,2</sup>, Shuai Chen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>Henan Province Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Structural Engineering, Zhengzhou Henan

Received: Sep. 9<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 30<sup>th</sup>, 2024; published: Oct. 12<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Coarse-grained soil is widely distributed in nature and widely used in engineering, so it is of great significance to study its mechanical properties. In this study, the effects of increasing the stone

content on the shear strength and deformation characteristics of coarse-grained soil were studied by using a large-scale triaxial shear test to study the original soil and the improved soil with 30% gravel (crushed stone soil). The test results show that after adding 30% crushed stone, the permeability of coarse-grained soil is enhanced, and the time required is shorter to reach the same degree of consolidation. The stress-strain curves of virgin soil and gravel soil showed strain hardening characteristics. The strength of the two kinds of soil increases with the increase of confining pressure, and the strength of gravel soil is greater than that of the original soil under the same confining pressure, and the larger the confining pressure, the greater the difference. The addition of crushed stone increases the internal friction angle of coarse-grained soil but reduces the cohesion of coarse-grained soil.

## Keywords

Coarse-Grained Soils, Large-Scale Triaxial Tests, Gravel Content, Mechanical Characteristics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自然界中土的种类多种多样且性质不同,通过目测能直观感受到其颗粒散碎、粒径大小差异明显、含有大量砾石碎石的土可称为粗粒土,而现行规范规定:粗粒土是指粒径在 0.075~60 mm 的土颗粒含量占土样总质量 50%以上的土[1]。粗粒土与常见土不同,有其独特的物理力学性质。粗粒土资源充沛、获取便捷,且可压实性强、不易沉降下陷并具有高承载力等优点[2],故被大量用于建造坝体、河堤、路堤以及其它各种水工结构和设施,在大量的工程中都发挥着重要作用。因此,了解其物理力学特性对工程的安全稳定具有重要意义。所以,粗粒土的变形和强度特征以及应力应变关系是具有重要意义且值得研究的问题。

通过试验对粗粒土进行研究,可以获得较为真实准确的结果,这对于工程的开展和进行具有重要的作用。试验可分为现场试验和室内试验,现场试验具有土样扰动小、准确性高等优点,但是其操作较为困难,需要耗费较多的人力物力财力,而且,某些情况下,缺少进行现场试验的必要条件,因此多数情况下选择室内试验。国内外许多专家学者采用不同的方法、仪器设备对粗粒土的变形和强度特性进行了大量试验,取得了丰硕的研究成果,研究结果表明粗粒土的力学特性主要与密实度、围压、颗粒级配、含水量等因素有关[3]-[9]。针对上述影响因素,国内外许多专家学者还对粗粒土的力学特性进行了细致研究,陶庆东等[10]采用正交试验方法,通过大三轴试验研究了土石混合体填料,发现影响土石混合体内摩擦角大小的主要因素为含石量、含水量、岩石完整性。Ghasemzadeh 等[11]以级配差砂土试样为研究对象,在静止、循环加载条件下进行大型三轴试验,发现未加筋砂土最大凸起出现在离顶面 0.25 处,而不是中部。Lenart 等[12]对致密棱柱形砾石试样进行大型三轴试验,对负循环和试样预加载的影响进行了研究。杨志浩等[13]通过制备不同细粒含量的级配碎石填料,探究了细粒含量、围压及动应力幅值对循环荷载作用下试样累积塑性应变的耦合影响机制。蔡袁强等[14]使用 GDS 大型三轴试验设备对路基粗粒填料进行试验,研究其在饱和排水循环荷载下的规律。王启云等[15]使用 MTS 设备和自制模型来模拟列车的动载作用,发现振动应变与加载次数呈负幂函数关系。Cui 等[16]通过循环三轴试验,发现在相同的循环荷载作用下,初应力比越大或围压越小的试件,其累积轴向应变越大。He 等[17]通过动三轴试验研究偏应力、含水率和加载频率对粗粒土累积变形的影响,发现累积变形量随着偏应力、含水率和加载频率的增加而

增大。吴红波等[18]通过大三轴试验和 PFC<sup>3D</sup> 数值模拟, 研究内摩擦角与含石量的变化关系, 发现剪切过程中试样的体应变表现为先剪缩后剪胀, 含石量越高, 剪胀性越强。

目前工程中所用的粗粒土主要有两类, 一是直接选用原始土料, 二是选择人工改良配制土料。改良前后土的各项指标有何变化是急需掌握的知识, 因此, 研究改良后的粗粒土料的力学特性与原始土料相比有何异同具有重要意义, 这有利于确定粗粒土的最优含石率, 对于促进工程的稳定发展具有重要意义。因此, 本文以某工程原始土及掺杂 30%碎石的改良土为研究对象, 结合室内大型三轴试验, 从宏观角度分析二者的强度和变形特性有何异同。

## 2. 试验仪器与试验方法

本次试验为固结不排水三轴剪切试验, 所用仪器为 SZLB-4 型粗粒土三轴蠕变测试仪器(成都东华卓越科技有限公司, 见图 1), 该设备能够提供 1500 kN 轴向压力以及 3 MPa 围压。设备标准制样规格为:  $d \times h = 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ , 最大允许粒径为 60 mm。制样时, 尺寸效应需重点关注, 为降低尺寸效应的影响, 国内外大量专家学者经过研究发现: 制样时土料的最大粒径不应大于试样直径的 1/5, 高径比以 2~2.5 为宜[19] [20]。本次试验土样最大粒径为 50 mm, 小于土样直径的五分之一, 符合规定。



Figure 1. Test instruments

图 1. 试验仪器

本次试验采用人工手动拌料、分层装样, 总共分为六层, 每层高度为 10 厘米, 每层夯实至指定高度后都需要刮毛表面, 再进行下一层填料夯实(试验流程如图 2 所示)。制样结束需进行密封性检查, 保证试样密封完好再进行试验; 试样采用真空饱和法进行抽真空饱和。本次试验采用轴向应变式加压控制方式, 试验速率设定为 1 mm/min。试样峰值强度通过应变式破坏进行确定, 若试验出现峰值力, 则峰值出现后继续剪切一定时间, 待获取较完整加载破坏曲线后试验结束; 若无峰值, 则当轴向应变为 20%时, 试验结束。试样峰值力按下述说明确定: 1、以试验中出现的峰值作为本次试验的峰值力; 2、若无峰值, 取轴向应变为 15%对应的轴向力为峰值力。



**Figure 2.** Test process

**图 2.** 试验流程

### 3. 试验材料

两种试验土样的级配曲线如图 3 所示，土样的颗粒分布指标如表 1 所示。其中不均匀系数  $C_u$ 、曲率系数  $C_c$  按下式计算。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (2)$$

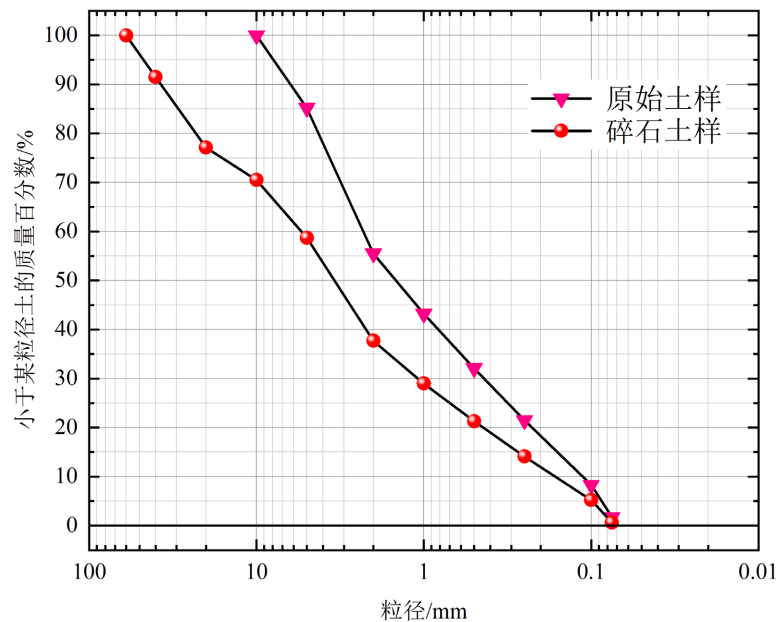


Figure 3. Grading curves of two types of test soils  
图 3. 两种试验用土的级配曲线

Table 1. Particle size characteristic values of the two types of test soils  
表 1. 两种试验用土的粒径特征值

土的种类	$d_{10}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$	$d_{60}/\text{mm}$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	制样密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
原始土	0.11	0.44	2.34	21.27	0.75	2000
碎石土	0.16	1.11	5.53	34.56	1.39	2000

根据规范规定,若土料  $C_u \geq 5$  且  $C_c = 1 \sim 3$ ,则该土料被划分为级配良好土,不能同时满足上述两个条件则为不良级配土。因此,由表 1 知原始土料为不良级配土,碎石土为级配良好土。因此,对于本试验所用土料而言,添加碎石使得其级配更加良好。

## 4. 试验结果分析

### 4.1. 固结过程分析

本次试验为三轴固结不排水剪切试验,对试样进行剪切前需要先通过施加围压对试样进行固结,当固结排水曲线逐渐平缓,即排水量不随时间增加即可认为固结完成,固结结果如图 4 所示。

从图中可以看到,在不同的围压条件下,试样的排水体积不同,并且排水量均随围压的增大而增大。这是因为围压越大,试样受到的荷载越大,试样被压缩得便越充分,其固结程度也就越高,其排水体积也就越大。并且在不同围压下,原始土在固结时间为 140 分钟左右时固结完成,而碎石土在固结时间为 120 分钟左右时固结完成,碎石土的固结速度要高于原始土。这是由于碎石颗粒的体积比原始土颗粒的体积大,且碎石颗粒表面粗糙、磨圆度较低,碎石与碎石之间的相对缝隙也较大。因此,添加碎石改变了土体的渗透性和孔隙结构,使碎石土相对于原始土形成了渗流优势通道,更加有利于水分的流动和排出。而且土颗粒内部存在大量细小通道,能够通过毛细作用使土体内维持一定的水分,而碎石颗粒的毛

细作用则非常弱,不利于水的保存。此外,碎石颗粒的比表面积远小于土颗粒,对水的吸附能力弱于土颗粒,更不利于水的保存。上述原因从宏观上综合表现出来便是碎石土的固结速率高于原始土。

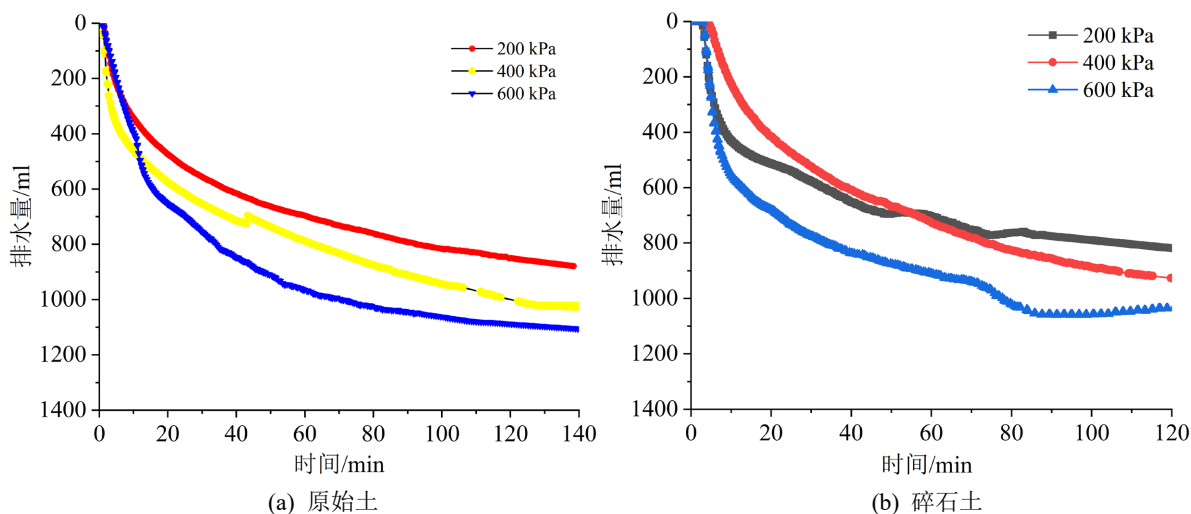


Figure 4. Consolidated drainage curves  
图 4. 固结排水曲线

## 4.2. 应力应变特性

对原始土和碎石土试样进行三轴剪切试验,围压分三个级别:200 kPa、400 kPa、600 kPa。试验结果如图 5 及表 2 所示。

从图 5 中可以看出,在剪切试验初期,应力增加速率较快,当达到 1%应变时应力增加速率减缓并趋于稳定,直至达到剪切破坏。两种土的峰值偏应力均随围压的增大而增大,且原始土和碎石土的应力应变曲线均为应变硬化型。原始土和碎石土的剪切破坏形态如图 6 所示,通过对比观察可知,剪切后的试样轴向高度降低、中上部变粗突出,尤其是中部变化显著,与剪切前形成了明显差异。并且试样表面无明显裂缝,符合应变硬化型剪切破坏形态。

从表 2 可以看出,相同围压下碎石土的峰值偏应力均大于原始土,其中 200 kPa 围压下峰值偏应力增量为 58.1%,400 kPa 围压下峰值偏应力增量为 71.5%,600 kPa 围压下峰值偏应力增量为 79.4%,增加的幅度均大于 50%,且围压越高,增值幅度越大,这表明 30%含量的碎石,显著提高了土体的强度,因此含石量会对粗粒土的强度产生重大影响。上述现象主要原因是:对于原始土而言,其内部含石量相对较少,且所含碎石颗粒体积也较小,因此,试样内部的石颗粒料能够被细小的土颗粒料所包裹,在围压及轴压作用下,石颗粒之间未发生接触或接触较少,此时试样的承载力主要由土来提供,因此试样表现出与土体相似的性质。当添加了 30%大颗粒的碎石时,细小颗粒的相对含量降低,无法有效包裹大颗粒料,因此,在围压和轴压作用下碎石颗粒开始逐渐接触,并随着剪切试验的进行,碎石颗粒接触、咬合程度进一步加深,此时碎石土样的承载力主要由碎石提供。由于碎石强度远大于土体强度,故在宏观上表现为碎石土试样的强度大于原始土试样的强度。因此,添加碎石能有效提高粗粒土的强度,使其承载力大幅提升。

## 4.3. 强度特性

图 7(a)~(d)为原始土与碎石土在不同围压下破坏时的莫尔圆及线性强度包络线,表 3 为原始土和碎石土的强度指标。

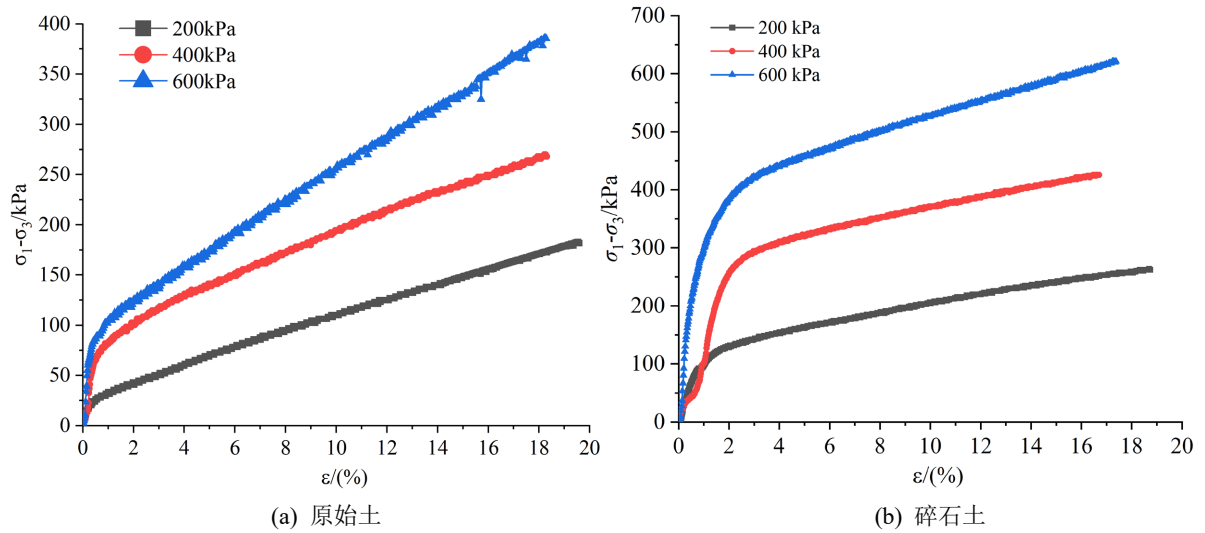


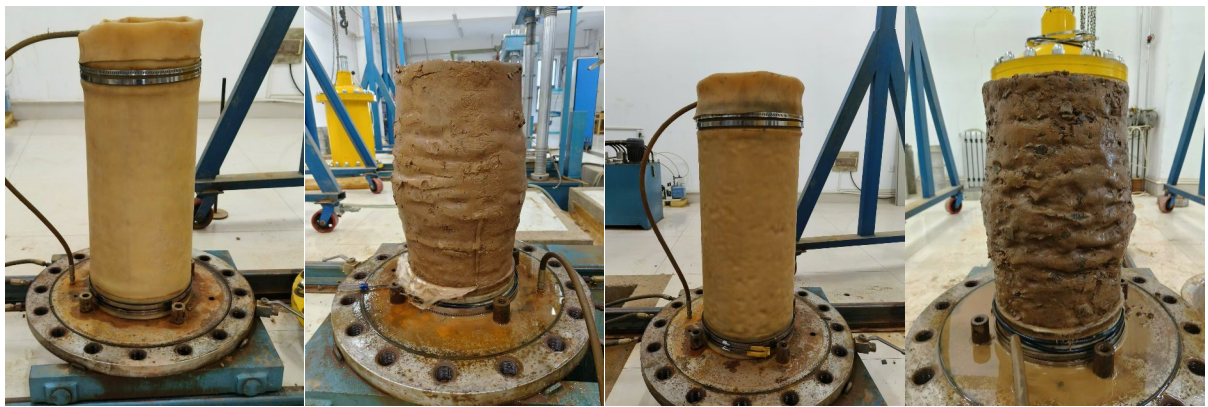
Figure 5. Deviator stress-axial strain curves under different confining pressures

图 5. 不同围压下的偏应力 - 轴向应变曲线

Table 2. Peak deviator stress of two types of soil under different confining pressures

表 2. 不同围压下两种土的峰值偏应力

围压/kPa	原始土峰值偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ /kPa	碎石土峰值偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ /kPa	峰值偏应力增量/%
200	148	234	58.1
400	240.3	412	71.5
600	330	592	79.4



(a) 原始土试样

(b) 碎石土试样

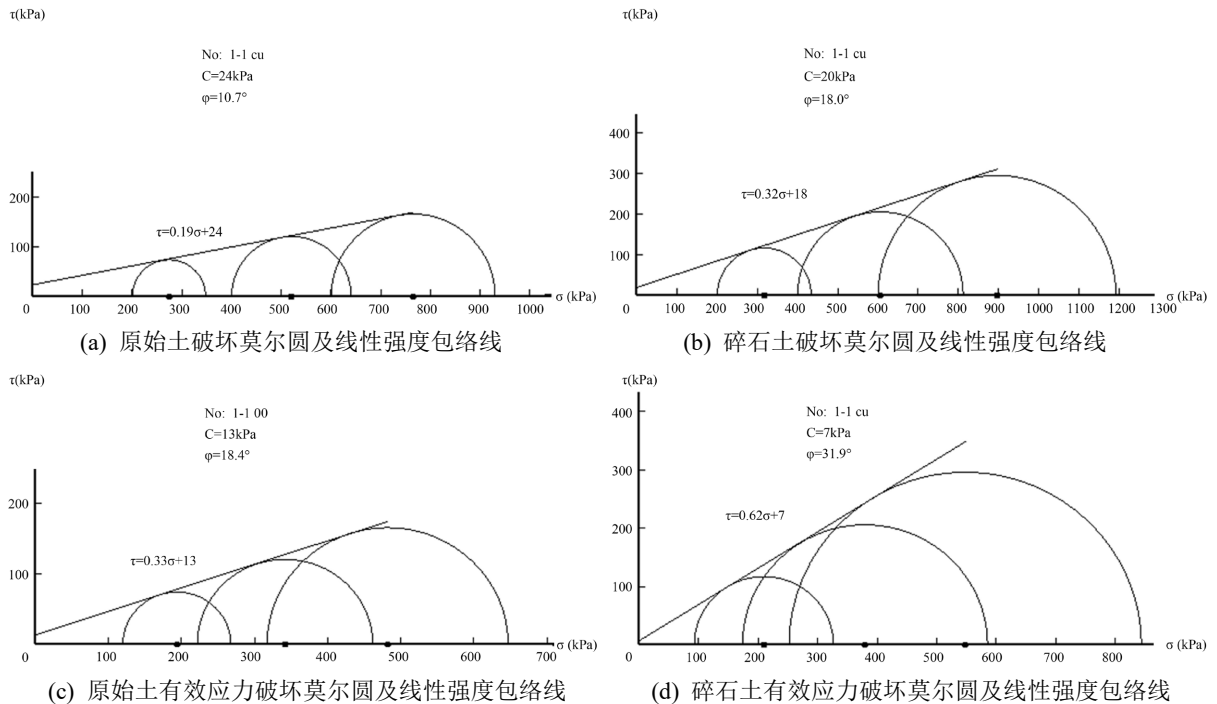
Figure 6. Shear failure patterns of two types of coarse-grained soils

图 6. 两种粗粒土的剪切破坏形态

从表中可以发现，碎石土的黏聚力和有效黏聚力均比原始土的小，而内摩擦角和有效内摩擦角均比原始土的大。造成上述现象的原因是：粗粒土的内摩擦力源于土颗粒间的相对运动，这一过程主要包括两个方面：一方面是颗粒间滑动产生的摩擦力；另一方面是颗粒间相互嵌锁形成的摩擦力。前者是由于土颗粒表面的不平整性，后者则由于邻近颗粒对彼此移动的限制作用。而添加碎石后，粗粒土的滑动摩擦力和咬合摩擦力都增大，导致碎石土的内摩擦角比原始土大，但同时碎石的加入也减少了土颗粒间的黏结作用，降低了粗粒土的黏性，使得碎石土的黏聚力比原始土小。

**Table 3.** Shear strength indexes for two types of coarse-grained soils  
**表 3.** 两种粗粒土的抗剪强度指标

土的种类	碎石添加量/%	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	有效黏聚力 $c/\text{kPa}$	有效内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
原始土	0	24	10.7	13	18.4
碎石土	30	20	18	7	31.9



**Figure 7.** Moiré circle and strength envelope of two coarse-grained soils  
**图 7.** 两种粗粒土的莫尔圆和强度包线

## 5. 结论

本文对原始粗粒土和添加了 30%碎石的改良粗粒土进行了大型三轴剪切试验，主要结论如下：

- 1) 添加碎石改变了粗粒土的渗透性和孔隙结构，使碎石土的排水能力优于原始土。
- 2) 原始土和碎石土的应力应变曲线均表现出应变硬化特性，试样剪切破坏形态均为中上部变粗突出，中部突出最为明显。
- 3) 原始土和碎石土的峰值强度均随围压的增大而增大。在同一围压条件下，碎石土的峰值强度大于原始土，且增加幅度比较显著。且围压越大，增加幅度越大。
- 4) 添加碎石使粗粒土的滑动摩擦和咬合摩擦增大，使碎石土的摩擦角大于原始土，但也降低了粗粒土的黏性，使得碎石土的黏聚力小于原始土。

## 参考文献

- [1] 水利部水利水电规划设计总院, 南京水利科学研究院. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [2] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [3] 李鹏, 李振, 刘金禹. 粗粒料的大型高压三轴湿化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(2): 231-234.
- [4] 秦红玉, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2004(10): 1575-1580.



- [5] 褚福永, 朱俊高, 殷建华.  $K_0$  固结粗粒土剪胀特性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3431-3436.
- [6] 金磊, 曾亚武, 张森. 块石含量及形状对胶结土石混合体力学性能影响的大型三轴试验[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 141-149.
- [7] 姜景山, 左永振, 程展林, 等. 不同密度粗粒料强度特性的大型真三轴试验[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2601-2608.
- [8] 左永振, 程展林, 潘家军, 等. 砾石土心墙料的大三轴湿化变形试验与规律分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 37-42.
- [9] 范玉梅, 钟萍, 王振祥, 等. 基于二元介质模型的砂类土剪切波速试验研究[J]. 地质学刊, 2021, 45(1): 100-106.
- [10] 陶庆东, 何兆益, 贾颖. 基于大三轴试验的土石混合体强度特性与影响因素[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(26): 310-318.
- [11] Ghasemzadeh, H., Jafarzadeh, M. and Ahmadi, S. (2024) Dominant Elastoplastic Behavior of Geocell-Reinforced Sand Subjected to Cyclic Loading under Large-Scale Triaxial Tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **176**, Article ID: 108281. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108281>
- [12] Lenart, S., Koseki, J., Miyashita, Y. and Sato, T. (2014) Large-Scale Triaxial Tests of Dense Gravel Material at Low Confining Pressures. *Soils and Foundations*, **54**, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.12.005>
- [13] 杨志浩, 岳祖润, 冯怀平, 等. 级配碎石填料大三轴试验及累积塑性应变预测模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2993-3002.
- [14] 蔡袁强, 赵莉, 曹志刚, 等. 不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1238-1246.
- [15] 王启云, 肖南雄, 张丙强, 等. 高速列车荷载作用下粗粒土填料振动变形特性分析[J]. 铁道学报, 2023, 45(1): 114-121.
- [16] Cui, K., Zhang, D., Li, P., Li, Q., Zhang, H. and Qing, Y. (2023) Influence of the Initial Static Stress State on the Accumulation Behaviour of a Coarse-Grained Soil under Long-Term Cyclic Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **172**, Article ID: 108042. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108042>
- [17] He, Z., Wang, P. and Liu, Y. (2023) Cumulative Deformation Prediction and Microstructure Change of Coarse-Grained Soil under Cyclic Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **173**, Article ID: 108136. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108136>
- [18] 吴红波, 李占甫, 江山, 等. 含石量对千枚岩土石混合体剪切特性影响的颗粒流数值模拟[J]. 公路, 2023, 68(5): 274-282.
- [19] 陈镠芬, 朱俊高, 殷建华. 三轴试样高径比对试验影响的颗粒流数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(7): 2643-2649.
- [20] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高. 堆石料尺寸效应研究面临的问题及多尺度三轴试验平台[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 1941-1947.