

砾石类型及含量对土石混合体力学性能影响研究

朱付辉¹, 林艺红², 李翔³, 孙键⁴, 刘顺青⁵

- (1. 厦门市交通建设质量安全中心, 厦门 361000; 2. 中交三航局第六工程(厦门)有限公司, 厦门 361006;
3. 厦门大学建筑与土木工程学院, 厦门 361005; 4. 苏交科集团检测认证有限公司, 南京 210019;
5. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 镇江 212100)

摘要: 为分析砾石类型对土石混合体力学特性的影响, 采用中型三轴试验系统开展土石混合体的剪切试验, 研究两种不同类型的土石混合体在不同含石率下强度及变形特性的变化规律。研究表明: 两种不同类型的土石混合体试样在不同含石率下的应力-应变曲线都没有明显的峰值, 均为硬化型曲线; 不同含石率下两种不同类型土石混合体试样的峰值强度总体上均随着含石率的增大而增加, 并且同等条件下土-角砾石混合体的峰值强度大于土-卵砾石混合体; 随着含石率的增加, 土-角砾石混合体的黏聚力先减小而后增大, 土-卵砾石混合体的黏聚力则先减小后小幅增大而后再减小, 两种类型土石混合体的内摩擦角都不断增大; 受荷时砾石颗粒间接触类型的不同是导致两种类型土石混合体力学特性差异的主要原因。研究结果可为土石混合体边坡的稳定性评价提供参考依据。

关键词: 土石混合体; 砾石类型; 含石率; 三轴试验; 强度特性

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2026)02-0094-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.015

Influence of Gravel Type and Content on the Mechanical Properties of Soil-Rock Mixtures

ZHU Fuhui¹, LIN Yihong², LI Xiang³, SUN Jian⁴, LIU Shunqing⁵

- (1. Xiamen Transportation Construction Quality and Safety Center, Xiamen 361000, China;
2. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Sixth Engineering (Xiamen) Company, Xiamen 361006, China;
3. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
4. Sujiaoke Group Testing and Certification Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 5. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: To analyze the impact of gravel type on the mechanical properties of soil-rock mixtures, a medium-sized triaxial testing system was employed to conduct shear tests on soil-rock mixtures. The study investigated the variations in strength and deformation characteristics of two different types of soil-rock mixtures at different rock contents. The research indicates that the stress-strain curves of the two different types of soil-rock mixture specimens at various rock contents do not exhibit a distinct peak and are of the hardening type. The peak strength of both types of soil-rock mixture specimens generally increases with the rise in rock content, and under the same conditions, the peak strength of the soil-angular gravel mixture is greater than that of

项目来源: 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室)开放基金资助(FJKLGH2023K002)。

作者简介: 朱付辉(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 交通工程及基础设施。

收稿日期: 2025-03-03

the soil-pebble gravel mixture. As the rock content increases, the cohesion of the soil-angular gravel mixture first decreases and then increases, while the cohesion of the soil-pebble gravel mixture initially decreases, then slightly increases, and subsequently decreases again. The internal friction angle of both types of soil-rock mixtures continuously increases. The primary reason for the differences in mechanical properties between the two types of soil-rock mixtures is the different types of contact between gravel particles under load. The research results can provide a reference basis for the stability assessment of soil-rock slopes.

Key words: soil-rock mixture; gravel type; rock content; triaxial test; strength characteristics

0 引言

土石混合体中“块石”及“土体”力学特性存在差异,导致其力学特性与一般岩体或土体有较大的不同。为区别于其他岩土体, Napoli 等^[1]将其命名为 Bimrocks; 张超等^[2]、杨忠平等^[3]将其命名为“土石混合体”。土石混合体力学性能的复杂多变给相关的工程建设带来很多困难,因此,研究不同类型的土石混合体力学性能具有重要的工程意义。

随着土石混合体逐渐被学术界及工程界认同,国内外学者对土石混合体的力学特性开展了一系列研究,主要为室内外试验及微观数值模拟。刘新荣等^[4]、李志清等^[5]、龚健等^[6]通过大型直剪试验研究了含石率、含水率、干湿循环、颗粒破碎特征以及细粒土性质对土石混合体宏观力学特性的影响;金磊等^[7]、夏加国等^[8]、曾章波等^[9]通过大型三轴剪切试验研究了含石率、超粒径颗粒等因素对土石混合体强度特性及变形的影响规律。另一方面,现场原位测试也是获取土石混合体力学性能的重要途径^[10-12]。如孙永帅等^[13]采用自主设计的大型推剪仪研究了基覆面效应下含石率对土石混合体变形的影响,得到了其最大剪应力的变化规律;李梅华^[14]基于大型原位推剪试验,研究了山西省平朔露天矿边坡土石混合体的力学特性,得到了含石率对剪切强度指标的影响规律;王江营等^[15]通过水平推剪试验,研究了土石混填地基在不同水环境下的承载特性及变形机理。上述研究都是针对单一类型的土石混合体。自然界中土石混合体的块石形态通常分为有棱角和无棱角两类,这两类不同的土石混合体在不同含石率下的力学性能尚缺乏系统研究。

为此,采用中型三轴试验系统,开展两种不同类型土石混合体的三轴剪切试验,研究两种不同类型的土石混合体在不同含石率下强度及变形特性的变化规律。研究结果可为土石混合体边坡的稳定性

评价提供参考。

1 试验方案

1.1 试验用土及块石料

试验采用中型三轴仪,试样的直径及高度分别 101、200 mm。试验所用土样的级配如下:粒径在 1.0~0.5 mm 占 1.1%, 0.5~0.25 mm 占 2.6%, 0.25~0.075 mm 占 28.1%, 小于 0.075 mm 占 68.2%。土样的液限为 29.2%, 塑限为 17.2%, 塑性指数为 12,属于含砂低液限黏土。试验所用的砾石料为角砾石及卵砾石,为减小尺寸效应,试验所用砾石料的粒径小于 20 mm。试验仪器为电子万能试验机(CSS-44050),试验过程中,利用计算机对应力或应变进行控制。

1.2 试验方案

采用三轴固结排水剪切试验,分别研究不同砾石类型下含石率对土石混合体力学特性的影响。所有试样中,控制干土料与砾石料的总质量为 3 000 g。试验选取尺寸为 16~20 mm 的角砾石及卵砾石。试验方案见表 1。每组试验为 3 个试样,围压分别为 200、400、800 kPa。纯土的剪切试验速率取为 0.05 mm/min,土石混合体的剪切试验速率取为 0.1 mm/min,剪切至 30 mm 终止。

表 1 不同类型土石混合体的试验方案

Table 1 Experiment program for different types of soil-rock mixtures

砾石类型	含石率/%	干土质量/g	砾石质量/g
	0	3 000	0
角砾石	20	2 400	600
	30	2 100	900
	50	1 500	1 500
	70	900	2 100
	30	2 100	900
卵砾石	40	1 800	1 200
	50	1 500	1 500
	60	1 200	1 800

岩土力学

2 试验结果与分析

2.1 含石率对土石混合物应力-应变曲线的影响

由图 1、2 可知：两种不同类型的土石混合物试样在相同围压不同含石率下应力-应变曲线都没有明显的峰值，均为硬化型曲线；随着含石率的增大，两种类型试样的应力-应变曲线的硬化现象逐渐增强，高围压下尤其显著；相同围压下随着含石率的增大，土-角砾石混合体的关系曲线出现明显的上下波动，在含石率为 70% 时尤为明显，而土-卵砾石

石混合体的关系曲线则波动较小。

2.2 含石率对土石混合物弹性模量的影响

采用应力-应变曲线上初始直线段的斜率作为其弹性模量，得出了不同含石率及围压下弹性模量的关系曲线，如图 3 所示。分析得出，相同围压下，随着含石率的增加，两种不同类型土石混合体的弹性模量都逐渐增大；相同含石率下，随着围压的增加，两种不同类型土石混合体的弹性模量也逐渐增大；含石率及围压均相同条件下，土-卵砾石混合体的弹性模量略大于土-角砾石混合体。

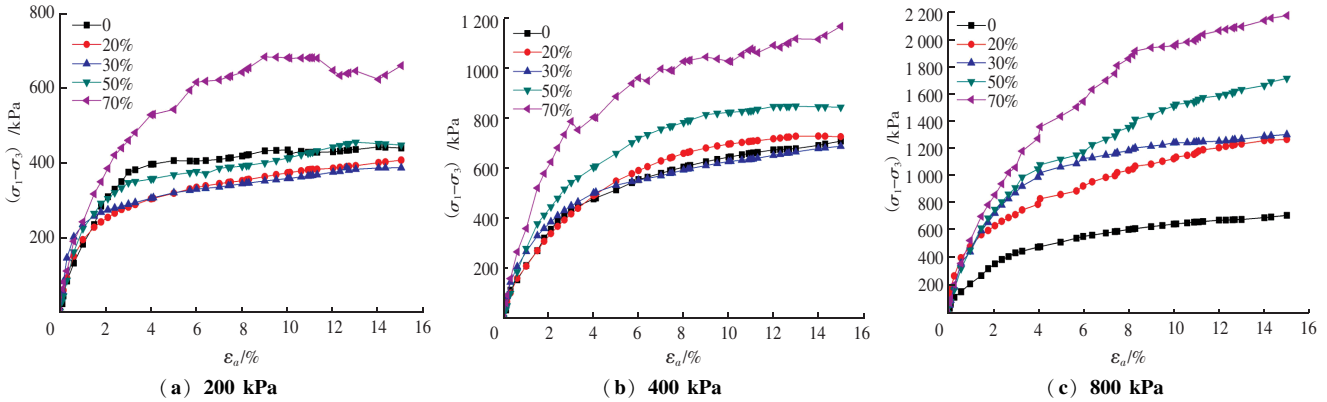


图 1 不同含石率下土-角砾石混合体的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of soil-gravel mixtures with varying stone contents

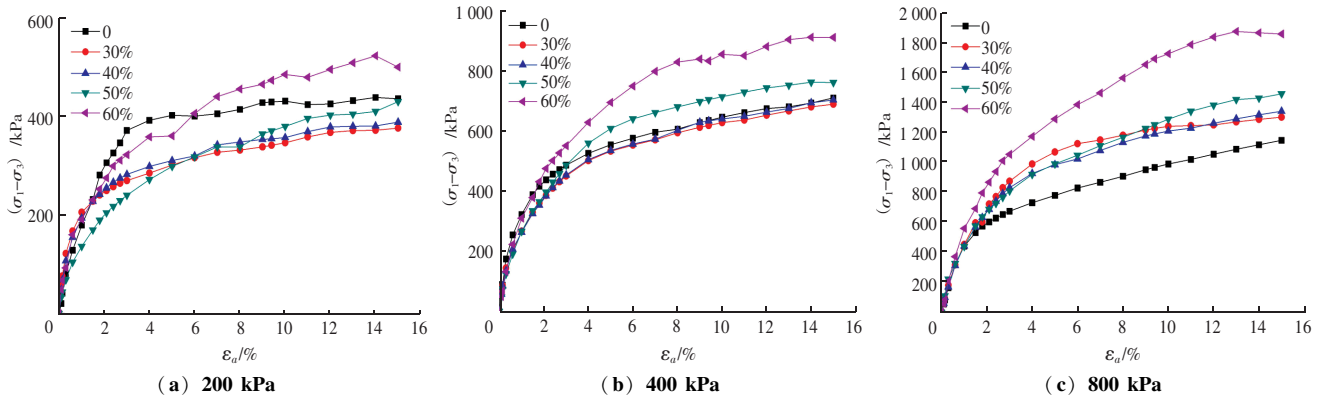


图 2 不同含石率下土-卵砾石混合体的应力-应变曲线

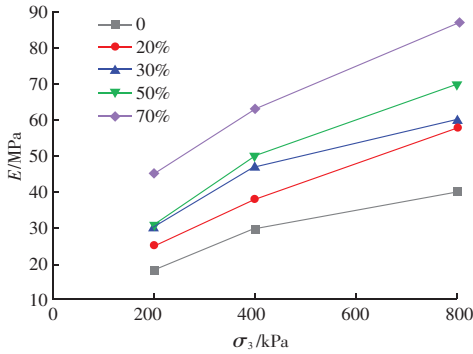
Fig. 2 Stress-strain curves of soil-gravel mixtures under varying stone contents

2.3 含石率对土石混合物强度特性的影响

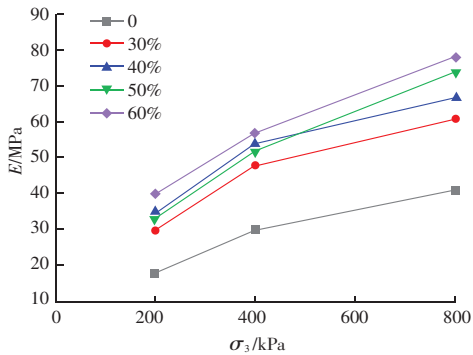
两种不同类型的土石混合物在围压分别为 200、400、800 kPa 时各种含石率下的峰值强度曲线如图 4 所示。相同围压不同含石率下的两种不同类型土石混合物试样的峰值强度总体上均随着含石率的增大而增加，并且相同含石率下土-角砾石混合体的峰值强度大于土-卵砾石混合体。

通过两种不同类型土石混合体的峰值强度可整

理出不同含石率下各试样破坏时的莫尔应力圆，进而可得出不同含石率下各组试样的强度参数指标，如图 5 所示。随着含石率的增加，土-角砾石混合体的黏聚力先减小而后增大，土-卵砾石混合体的黏聚力则先减小后小幅增大而后再减小；两种类型土石混合体的内摩擦角都不断增大。当含石率从 0 增加到 70% 土-角砾石或 60% 土-卵砾石时，土-角砾石混合体的内摩擦角从 22.1° 增加到了 34° ，增加了



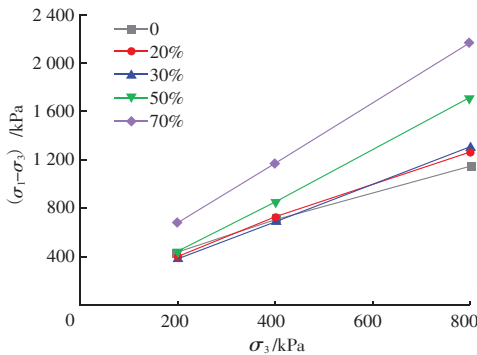
(a) 土-角砾石混合体



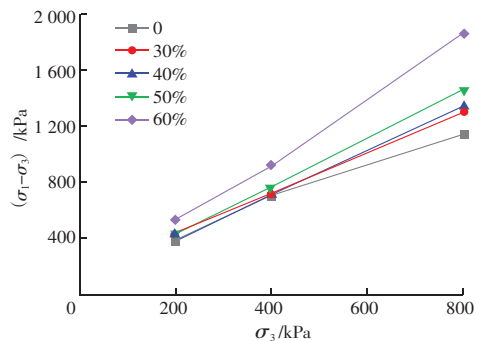
(b) 土-卵砾石混合体

图 3 不同含石率及围压下土石混合体的弹性模量曲线

Fig. 3 Elastic modulus curves of soil-rock mixtures under varying stone contents and confining pressures



(a) 土-角砾石混合体



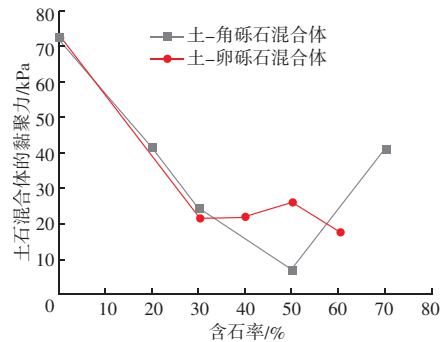
(b) 土-卵砾石混合体

图 4 不同石率下两种不同类型土石混合体的峰值强度-围压曲线

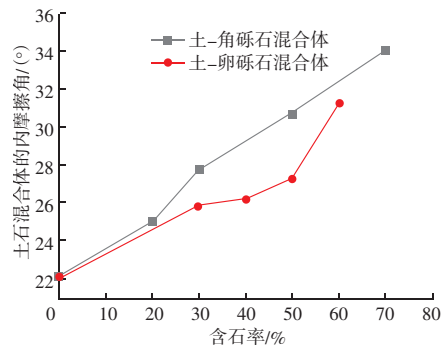
Fig. 4 Peak strength versus confining pressure curves for two different types of soil-rock mixtures with varying stone contents

53.8%；而土-卵砾石混合体的内摩擦角从 22.1° 增加到了 31.3°，增加了 41.6%。上述试样结果的主要原因如下，随着含石率的增加，试验剪切过程中两种砾石颗粒间的接触摩擦及相互咬合作用不断增加，从而导致了其内摩擦角的不断增大。

对土-角砾石混合体而言，当含石率为 0~50% 时，其黏聚力从 72.6 kPa 减小为 6.9 kPa，减小了 90.5%，而当含石率为 50%~70% 时，土-角砾石混合体的黏聚力从 6.9 kPa 增加到了 41 kPa，增加了约 4.94 倍，此时黏聚力的增加主要是由于角砾石之间的咬合力所致。对土-卵砾石混合体而言，当含石率为 0~60% 时，其黏聚力从 72.6 kPa 减小到了 17.5 kPa，减小了 75.9%；而当含石率为 30%~50% 时，其黏聚力从 21.8 kPa 增加到了 25.7 kPa，增加了 17.9%，主要还是由于卵砾石之间的咬合力所致。



(a) 黏聚力与含石率的关系曲线



(b) 内摩擦角与含石率的关系曲线

图 5 不同含石率下两种土石混合体的抗剪强度参数曲线

Fig. 5 Shear strength parameter curves for two types of soil-rock mixtures with varying stone contents

为了更清楚地分析不同含石率下土石混合体试样黏聚力及内摩擦角增量（与纯土相比）的变化规律，将试验数据进行整理拟合，分别得到两种不同类型土石混合体的黏聚力与含石率的拟合关系曲线

岩土力学

如下:

$$c_1 = \begin{cases} 72.6 - 140w_g & 0 \leq w_g \leq 5\% \\ 72.6 - 72.6w_g & 50\% < w_g \leq 70\% \end{cases} \quad (1)$$

$$c_2 = 72.6 - 107w_g \quad (0 \leq w_g \leq 60\%) \quad (2)$$

式中: c_1 、 c_2 分别为土-角砾石及土-卵砾石的黏聚力; w_g 为含石率。

两种不同类型土石混合体的内摩擦角增量(与纯土相比)与含石率的拟合关系曲线如下:

$$\Delta\varphi_1 = 17.2w_g - 0.057 \quad (0 \leq w_g \leq 70\%) \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_2 = 13.6w_g - 0.447 \quad (0 \leq w_g \leq 60\%) \quad (4)$$

式中: $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 分别为土-角砾石及土-卵砾石的内摩擦角增量; w_g 为含石率。

3 结论

采用中型三轴试验系统开展两种不同类型土石混合体的三轴剪切试验,研究两种不同类型土石混合体力学特性的变化规律,主要得出如下结论:

(1) 两种不同类型的土石混合体试样在相同围压不同含石率下的应力-应变曲线都没有明显的峰值,都为硬化型曲线。随着含石率的增大,土-角砾石混合体的关系曲线出现明显的上下波动,而土-卵砾石混合体的曲线则波动较小。

(2) 随着含石率及围压的增加,两种不同类型土石混合体的弹性模量都逐渐增大。

(3) 相同围压不同含石率下的两种不同类型土石混合体试样的峰值强度总体上均随着含石率的增大而增加,并且同等条件下土-角砾石混合体的峰值强度大于土-卵砾石混合体。

(4) 随着含石率的增加,土-角砾石混合体的黏聚力先减小而后增大,土-卵砾石混合体的黏聚力则先减小后小幅增大而后再减小;两种类型土石混合体的内摩擦角都不断增大。

(5) 受荷时砾石颗粒间接触类型不同是导致两种类型土石混合体力学特性差异的主要原因。

参 考 文 献

- [1] NAPOLI M L, BARBERO M, RAVERA, E, et al. A stochastic approach to slope stability analysis in bimrocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 101, 41-49.
- [2] 张超, 俞缙, 朱东平, 等. 土石混合体大型三轴剪切力学特性的颗粒级配效应 [J]. 中国公路学报, 2024, 37 (10): 61-72.
- [3] 杨忠平, 李勇华, 李诗琪, 等. 不同含石率土石混合体水力侵蚀异质特征及机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43 (1): 133-145.
- [4] 刘新荣, 涂义亮, 王鹏, 等. 基于大型直剪试验的土石混合体颗粒破碎特征研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (8): 1425-1434.
- [5] 李志清, 文吉英, 姚国明, 等. 土石混合体大型直剪设备研发与应变锁骨强度特征试验研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31 (6): 1975-1988.
- [6] 龚健, 梁恒玮, 王剑峰, 等. 含石量、粗颗粒级配与细粒土性质对土石混合体剪切特性影响研究 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2024, 49 (6): 1244-1258.
- [7] 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.
- [8] 夏加国, 胡瑞林, 祁生文, 等. 含超细颗粒土石混合体的大型三轴剪切试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (8): 2031-2039.
- [9] 曾章波, 黄华, 梅龙喜, 等. 土石混合体三轴剪切试验及三维多重剪切界面模型 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (3): 644-651.
- [10] 孙永帅, 胡瑞林. 不同角度基覆面上土石混合体变形试验研究及对滑坡演化的启示 [J]. 地质前缘, 2023, 30 (3): 494-504.
- [11] 黄宜胜, 方鼎元, 李建林, 等. 土石混合体剪切强度的室内外对比试验研究 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41 (6): 26-30.
- [12] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (6): 1270-1277.
- [13] 孙永帅, 胡瑞林. 土石混合体变形破坏的基覆面效应研究 [J]. 西南交通大学学报, 2018, 53 (2): 330-336.
- [14] 李梅华. 基于原位推剪试验的露天矿边坡土石混合体力学特性分析 [J]. 矿业安全与环保, 2019, 46 (5): 21-24, 31.
- [15] 王江营, 曹文贵, 翟友成, 等. 不同水环境下土石混填地基水平推剪试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47 (2): 615-620.