

## 细粒土体及加载速率对土石混合体力学行为的影响

王洪兵, 任 禾, 张学杰, 孙文超, 许 凡, 罗安静, 徐文杰

### Influence of fine-grained soil and loading rate on the mechanical behavior of soil rock mixtures

WANG Hongbing, REN He, ZHANG Xuejie, SUN Wenchao, XU Fan, LUO Anjing, and XU Wenjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403009>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 土石混合体的剪应力波动和跌落行为机制

Mechanism of shear stress fluctuation and dropping of the soil-rock mixture

胡峰, 李志清, 刘琪, 胡瑞林 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 90-101

#### 含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究

A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture

邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 111-111

#### 尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响

Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil

陈鑫, 张泽, 李东庆 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 74-82

#### 根-土复合体的三轴试验及其强度分析

Triaxial test and strength analysis of root-soil composite

钟彩尹, 李鹏程, 马滔, 吴礼舟 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 97-104

#### 基于离散元法的砂石混合物直剪试验结果分析

An analysis of direct shear test results of sand-gravel mixture based on the discrete element method

苏永华, 王栋 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 97-104

#### 基于等速线模型的一维黄土动荷载响应分析

Dynamic load response analysis of 1-D loess based on the equal speed line model

王文丽, 王兰民 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 113-119



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403009

王洪兵, 任禾, 张学杰, 等. 细粒土体及加载速率对土石混合体力学行为的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 86-92.  
WANG Hongbing, REN He, ZHANG Xuejie, et al. Influence of fine-grained soil and loading rate on the mechanical behavior of soil rock mixtures[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 86-92.

## 细粒土体及加载速率对土石混合体力学行为的影响

王洪兵<sup>1</sup>, 任禾<sup>2</sup>, 张学杰<sup>3</sup>, 孙文超<sup>2</sup>, 许凡<sup>3</sup>, 罗安静<sup>3</sup>, 徐文杰<sup>4</sup>

(1. 云南交投集团投资有限公司, 云南昆明 650228; 2. 云南省交通规划设计研究院股份有限公司, 云南昆明 650011; 3. 云南天坤人力资源管理有限公司, 云南昆明 650220; 4. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 土石混合体在工程中广泛应用于填筑和路基等领域, 其力学行为对工程结构的稳定性和安全性具有重要影响。文章通过对含石量相似但细粒土为非黏性和黏性 2 种不同材料的试样, 采用室内三轴试验开展相关研究, 研究细粒土特性及试验加载速率对土石混合体力学行为的影响。结果表明: (1) 在排水条件下, 细粒土体为非黏性的试样展现出较高的强度特征, 而在不排水条件下, 细粒土体为黏性的试样则表现出更高的强度, 这一发现凸显了细粒土特性在不同排水条件下对土石混合体强度的重要影响; (2) 加载速率变化对土石混合体力学行为的显著影响, 较快的加载速率导致内部块石颗粒更剧烈的运动、旋转和更频繁的破坏, 从而影响了土石混合体的宏观力学特性。研究成果可为土石混合体工程的设计和施工提供参考。

**关键词:** 土石混合体; 三轴试验; 细粒土体; 加载速率; 力学行为

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0086-07

## Influence of fine-grained soil and loading rate on the mechanical behavior of soil rock mixtures

WANG Hongbing<sup>1</sup>, REN He<sup>2</sup>, ZHANG Xuejie<sup>3</sup>, SUN Wenchao<sup>2</sup>, XU Fan<sup>3</sup>, LUO Anjing<sup>3</sup>, XU Wenjie<sup>4</sup>

(1. Yunnan Communications Investment & Construction Group Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650228, China; 2. Broadvision Engineering Consultants Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650011, China; 3. Yunnan Tiankun Human Resource Management Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650220, China; 4. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Soil-rock mixtures are widely used in engineering for filling and subgrade applications, with their mechanical behavior playing a critical role in the stability and safety of engineering structures. This study utilized two types of fine-grained soils, non-cohesive and cohesive, to construct the soil-rock mixtures with similar stone content; indoor triaxial tests were conducted to investigate the effects of fine-grained soil type and loading rate on the mechanical behavior of soil-rock mixtures. The results show that under drained conditions, the strength of the soil-rock mixture containing non-cohesive soil is higher than that of cohesive soil, while under undrained conditions, the strength of the soil-rock mixture containing cohesive soil is higher. Variations in loading rate significantly impacted the mechanical behavior of soil-rock mixtures, with faster loading rates causing more

收稿日期: 2024-03-05; 修订日期: 2024-08-27

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 公路弃渣场失稳灾害评估及防治关键技术研究及运用示范项目 (YCIC-YF-2022-09)

第一作者: 王洪兵(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治与研究工作。E-mail: [548836867@qq.com](mailto:548836867@qq.com)

通讯作者: 任禾(1982—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事水环保、弃渣场稳定性等方面的工作。E-mail: [184630368@qq.com](mailto:184630368@qq.com)

intense movement, rotation, and frequent damage to internal stone particles, ultimately influencing their macroscopic mechanical properties. This study provides valuable insights for the design and construction of soil-rock mixture engineering.

**Keywords:** soil-rock mixture (S-RM); triaxial test; fine soil; loading velocity; mechanical behavior

土石混合物(soil-rock mixtures, S-RM)是由具有一定尺寸的强度较高岩块、强度相对较软的土体充填成分及相应的孔隙等组成的多相体系<sup>[1-2]</sup>,这种岩土材料的物理力学性能与均质岩土体有显著差别,并且极易受其内部组成结构和其他因素影响。土石混合物在自然界中分布广泛,由于其复杂的物理力学行为特征,有时会引起地质灾害,进而给工程及临近居民带来灾难<sup>[3-5]</sup>。据自然资源部统计资料,2023年,全国共发生滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害3 666起,其中土石混合物滑坡占据了较大比例。这不仅给人民的生命和财产造成了极大的损失和威胁,同时也制约着经济社会的可持续发展,如2024年5月1日夜间2点,广东梅州一大埔(梅大)高速填方路基边坡失稳,导致了坍塌和滑坡灾害,造成了48人死亡,30人受伤<sup>[6]</sup>;2015年12月20日发生的深圳光明新区特大滑坡事故,红坳淤泥渣土发生大规模渣土堆填物滑坡,造成73人死亡,17人受伤,33栋建筑物被损毁、掩埋,事故直接经济损失8.81亿元<sup>[7]</sup>;1986年雅鲁藏布江樟木乡发生土石混合物滑坡,伤亡30余人,8 000余人生命财产安全受到威胁,总损失超过8亿<sup>[8]</sup>;2005年大渡河丹巴县建设街后山土石混合物滑坡发生强烈变形,整体呈下滑趋势,威胁大半个丹巴县城,严重威胁4 620余人的生命财产安全<sup>[8-9]</sup>。

国内外许多学者针对土石混合物复杂的物理力学特性,开展了一系列研究。成浩等<sup>[10]</sup>采用离散元法研究了含石量对土石混合物崩塌运动的影响。邵忠瑞等<sup>[11]</sup>通过大型室内剪切仪开展了不同含石量的剪切试验,研究含石量对软岩土石混合体力学特性的影响。Vallejo等<sup>[12]</sup>开展了土石混合体的直剪试验研究,结果表明试样中岩块含量通常会影响到S-RM的物理力学行为,抗剪强度取决于S-RM中大颗粒岩块的相对含量。吴红波等<sup>[13]</sup>分别开展了室内三轴试验和数值模拟试验研究,结果均表明试样内摩擦角随含石量增大而增大,黏聚力则随含石量增大呈现出先增大后减小的趋势,且剪切过程中试样含石量越高,剪胀性越强。总的来说,土石混合体的含石量越高,其物理力学特性越好。此外,还有一些学者从块石特征、颗粒级配等方面入手,研究这些因素对土石混合物物理力

学特性的影响。李诗琪等<sup>[14]</sup>采用自主研发的装置开展物理试验,研究了间断级配对土石混合物物理力学特性的影响。马丽娜等<sup>[15]</sup>通过压实试验和颗粒破碎试验,研究了不同配比下土石混合体的物理力学性质。刘宝臣等<sup>[16]</sup>开展大型直剪试验,研究了颗粒球度对土石混合物剪切特性的影响,结果表明土石混合体的抗剪强度随颗粒球度的增大而减小。Xu等<sup>[17]</sup>、徐文杰等<sup>[18-19]</sup>一方面通过野外大型现场试验,研究了土石混合体的力学特性与其粒度组成的关系;另一方面,借助数字图像处理技术,实现了S-RM中块石真实细观结构几何模型的重建,并在此基础上进行了一系列的数值试验,研究了块石分布和块石特征对土石混合体力学特性的影响。

综上,虽然目前国内外针对S-RM的含石量、块石特征、颗粒级配等对其物理力学特性的研究已经开展了相关研究工作,但目前对构成土石混合体的细粒土体和加载速度等对其力学特性影响的研究相对较少,而这对于实际工程中设计土石混合体的施工及稳定分析至关重要。本文在现有研究的基础上,针对选取的典型土石混合物试样,通过室内三轴试验的方式,开展细粒土体性质及加载速率对土石混合物变形及力学特性的影响研究,以揭示土石混合体的宏观力学特性演化规律及其细观特性机理,为工程建设及灾害评估提供支撑。

## 1 土石混合物三轴剪切试验

### 1.1 试样特性

土石混合物试样取自云南省某高速公路3个不同弃渣场地,编号分别为T1、T2、T3。其中,T1试样呈褐红色和棕色,细粒土体主要由黏土组成,块石岩性主要为玄武岩;T2试样呈棕色、棕黄色、灰白色,细粒土体主要由砂土组成,块石岩性主要为花岗岩;T3试样呈杂色,细粒土体主要为黏性土,块石岩性主要为砂岩和少量灰岩。3种试样的干密度分别为1.49, 1.49, 2.23 g/cm<sup>3</sup>,级配曲线如图1所示。T3试样的干密度大于T1、T2试样,这是因为T3试样中含有较大的块石、砾石等颗粒,自身具有较高的密度,可以有效地增加试样干密度;此外,大颗粒块石的存在有助于减少试样中的空隙,增加试样干密度。

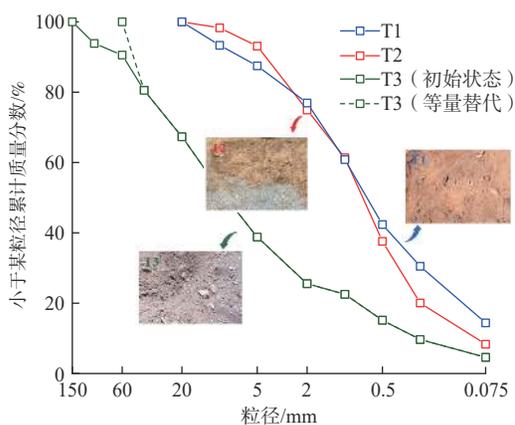


图 1 土石混合体级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of different S-RM

从图 1 可以看出, T1、T2 的含石量和干密度均相似, 但块石成分、细粒土体成分却存在明显差异。根据徐文杰等<sup>[2]</sup>的研究成果, 可计算出土石阈值为 5 mm、T1 中黏土质量分数和 T2 中砂土质量分数分别为 88.5% 和 93.1%、含石量均小于 25%, 此时试样的强度基本取决于土体, 可用于研究细粒土体性质对土石混合体力学特性的影响。T3 内部含有较大粒径的块石, 根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[20]</sup> 要求, 试样的最大粒径不超过试样尺寸的 1/5 (即 60 mm), 因此对于粒径大于 60 mm 的块石, 采用等量替代法进行替代(图 1)。

## 1.2 三轴试验

### 1.2.1 细粒土体特性对试样力学性质影响试验

采用应力应变控制式中型三轴试验仪(试样尺寸  $\phi 101 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ )研究构成土石混合体的细粒土体性质对其力学特性的影响。

对每一种试样分别进行饱和固结排水(consolidated drained, CD)和饱和固结不排水(consolidated undrained, CU)2 种工况下的三轴剪切试验, 并采用 100, 200, 400, 600 kPa 等 4 个围压状态, 加载速率取 0.06 mm/min。

由于 T1、T2 试样的粒度级配相近且干密度相同, 为获取密实度相近的试样, 两者采用相同的制样流程。根据试样的高度分 5 层制样, 各层土料质量相等, 每层击实至要求高度后, 将表面刨毛, 然后再加第二层土料, 如此继续直至击完最后一层, 完成制样。将制备完成的试样采用抽气法进行饱和。将饱和完成后的试样安装在试验仪上, 并采用双层橡胶膜进行保护, 以防止内层橡胶膜被块石戳破而导致试验失败。随后加装压力室, 对试样进行等向围压作用下的排水固结。固结完成后, 进行排水剪切试验和不排水剪切试验, 试验过程中, 通过排水管、量力环表、应变

计等设备对排水量、竖向压力、竖向应变等数据进行读取记录, 直至轴向应变达到约 15%, 随后停止加载, 卸载轴向应力及围压, 排掉围压室的水, 结束试验。

### 1.2.2 加载速率对土石混合体力学性质影响试验

针对 T3 试样, 采用清华大学大型三轴土工试验机(试样尺寸  $\phi 300 \text{ mm} \times 660 \text{ mm}$ )开展不同加载速率对试样力学性质的影响。采用固定围压(400 kPa)并设置 4 种加载速率工况(轴向加载速率分别为 0.30, 0.65, 1.30, 2.50 mm/min)进行饱和固结排水试验。

由于大型三轴试样重量较大, 需在试验机上制备并饱和试样。T3 试样内存在粒径较大且尖锐的块石, 因此制样时在乳胶模内侧加装一层 1 mm 厚的 PVC 薄膜, 防止块石刺破外层乳胶膜。根据试样的干密度与级配, 计算并称取所需质量的土石混合体, 搅拌均匀, 分 5 层装料击实; 制样完成后, 采用水头法对试样进行饱和; 之后固结、排水等操作与中小型三轴试验相同。

## 2 试验结果

图 2、图 3 为 T1 和 T2 试样在 CD、CU 条件下得到的偏差应力、体应变及孔隙水压力随轴向应变的变化曲线。从图 2 可以看出: 2 种试样总体呈现相同的应变硬化规律, 偏差应力均随围压的增大而增大, 随着试样剪切的进行, 偏差应力的增大速率逐渐变慢; 在低围压条件下(围压不超过 200 kPa), 随着剪切进行, 偏应力最终趋于稳定, 而在高围压条件下(围压大于 200 kPa), 应变硬化更为显著。

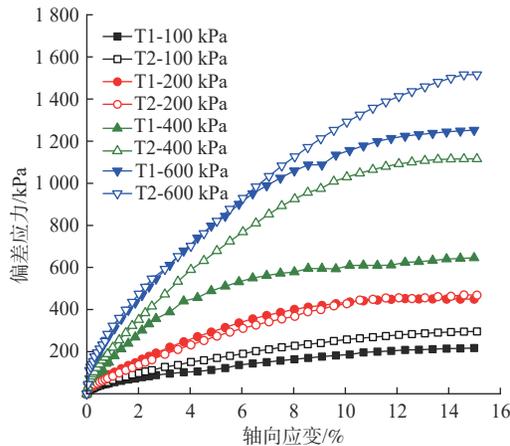
图 4 为 T3 试样在 400 kPa 围压、不同加载速率( $v$ )下的三轴试验结果。从图中可以看出, 在相同轴向应变下, 随着加载速率的增加, 试样的偏差应力和体应变均不断减小。

## 3 分析与讨论

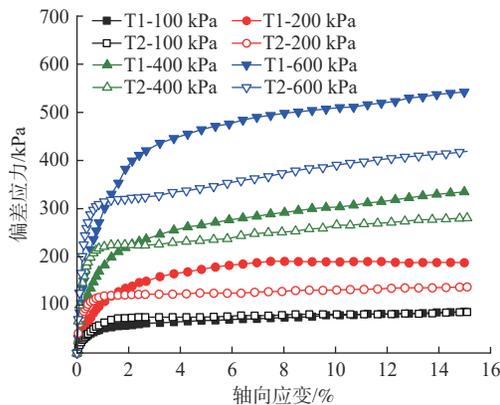
### 3.1 细粒土特性对 S-RM 力学性质影响

#### 3.1.1 应力-应变曲线特征

在 CD 工况下, 对比 2 种试样的应力发展过程, 可以看出: 在相同围压和轴向应变下, 由于构成 T1 试样的细粒土黏土含量较高, 含水率对黏土的力学性质影响较砂土大、且黏土透水性较差, 导致 T1 试样强度比 T2 试样低, 因而 T2 试样的偏差应力要高于 T1 试样(图 2a), 以 600 kPa 围压的工况为例, T2 试样的峰值偏差应力比 T1 试样高 350 kPa。同时由于 T2 试样含砂土、渗透性好, 在相同试验工况下排水要比 T1 试样好, 所以与 T1 试样相比, T2 会出现较大的剪缩(图 3a)。



(a) CD



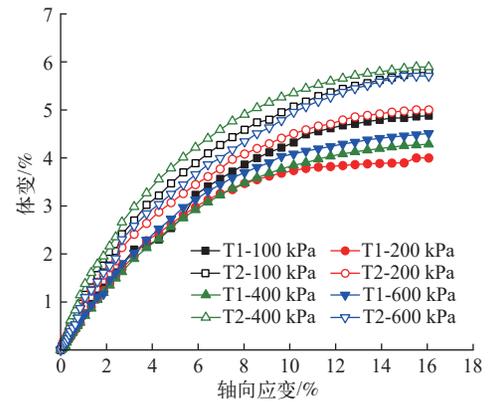
(b) CU

图2 不同围压下 T1 和 T2 试样偏差应力-轴向应变曲线

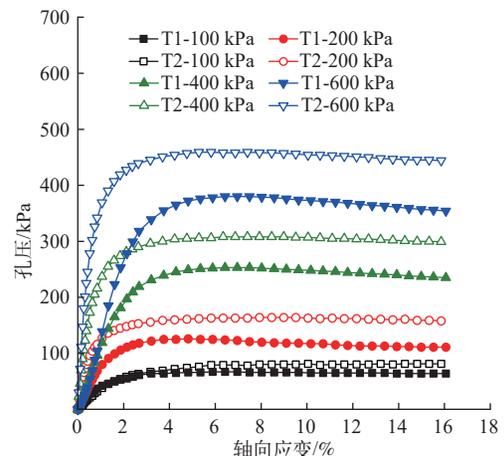
Fig. 2 Deviation stress-strain curves of samples T1 and T2 under different confining pressures

而在 CU 工况下, 由于不排水剪切过程中试样有被压缩趋势并产生超静孔隙水压力, 孔隙水压力随轴向应变的增大而增大, 之后逐渐稳定。但含砂土的 T2 试样透水性好, 在加载过程中产生较高的孔隙水压力, 从而使得其偏差应力略小于含黏土的 T1 试样。

此外, T1、T2 试样的体应变并不是都随围压增大而增大(图 3a), 如 T2 试样在 100 kPa 围压下的体应变大于在 200 kPa 下的体应变。为了进一步研究影响土石混合物试样变形及强度的内外因素, 分别对 CD 试验后 T1、T2 试样的粒度特征进行筛分, 得到不同围压下试验前、后试样中各个粒组含量的变化(图 5)。从图中可以看出, 试验后粒径大于等于土石阈值(即 5 mm)的块石含量明显减小, 表明试样剪切过程粒径较大的块石均发生了不同程度的破碎。且试验前后 T1、T2 粒径变化具有相同的规律: 20 mm 左右的块石破碎后, 产生 10 mm 及以下的颗粒粒径, 导致虽然 10 mm 颗粒粒径也略有降低, 但降低幅度略小于 20 mm 的颗粒; 5 mm 的颗粒含量降低最为显著, 最终导致 2 mm



(a) CD



(b) CU

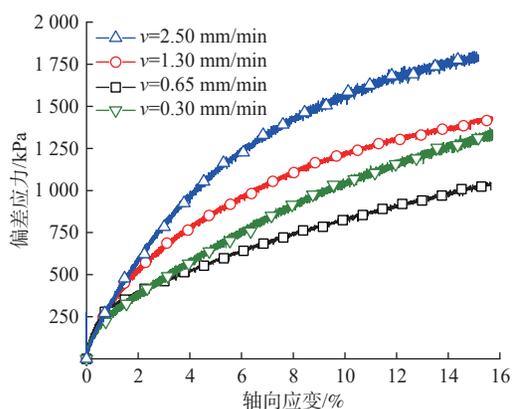
图3 不同围压下试样体应变及孔隙水压力-轴向应变曲线

Fig. 3 Volume strain and pore water pressure-axial strain curves of samples T1 and T2 under different confining pressures

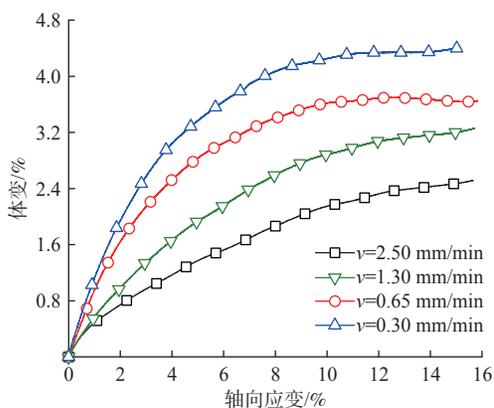
的颗粒含量大幅度增多, 以 600 kPa 围压的工况为例, 2 种试样 5 mm 颗粒的减少量均接近或超过了 6%; T1 试样 2 mm 颗粒的增加量接近 8%、T2 试样超过了 10%。此外, 随着围压的增加, 5 mm 及以上的颗粒减少越明显, 颗粒破碎越显著(图 4)。因此, 对于土石混合物而言, 由于含有粒径较大的块石颗粒, 在外荷载作用下, 这些较大块石的空间分布及在剪切过程中的颗粒旋转、位移和破碎等都将对其应力、体变演化发展产生不同程度的影响。

### 3.1.2 强度特性

根据图 2, 2 组土石混合物试样呈现明显的应变硬化特征, 没有明显的峰值应力, 为此根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[20]</sup> 选取轴向应变为 15% 时的偏差应力绘制  $p$ - $q$  曲线(图 6), 其中  $p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$ ,  $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ ,  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别是试样的轴压和围压。通过拟合试验数据, 得到土石混合物试样的黏聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ ), 如表 1 所示。



(a) 偏差应力-轴向应变曲线



(b) 体应变-轴向应变曲线

图 4 T3 试样在不同加载速率下的试验结果

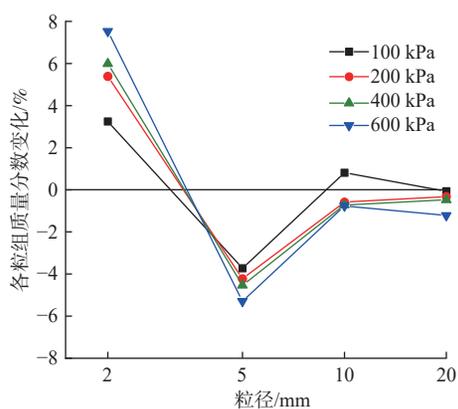
Fig. 4 Test results of sample T3 at different loading rates

构成 T1 试样的“土体”为黏性土，其黏聚力为 3.5 kPa；而构成 T2 试样的“土体”为砂土，导致其黏聚力为 0 kPa，但内摩擦角要大于 T1 试样。

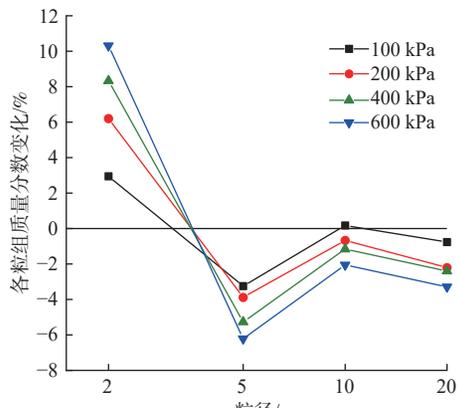
对比 CD 和 CU 两种工况下的强度参数，可以看出同一种土石混合体试样，由于试样在加载过程中会产生超静孔隙水压力，使得试样在 CU 工况下比 CD 工况下的强度低。但是在 CD 条件下 T2 试样 34° 的摩擦角高于 T1 试样 31° 的摩擦角，而 CU 条件下 T1 试样 20° 的摩擦角则高出 T2 试样 15° 的摩擦角。这是由于构成 T2 土石混合体试样的细粒土以砂土为主，砂土的变形受围压影响远比黏土敏感，在加载过程中产生的孔隙水压力比 T1 更高 (图 3b)，导致其强度降低更为明显。

### 3.2 加载速率对 S-RM 力学性质影响

图 4 中偏差应力和体应变均随着加载速率的增加不断减小，在 3.5 mm/min 的加载速率条件下，最大偏差应力、最大体变仅相当于在 0.3 mm/min 加载速率条件下的 60% 左右。这与目前关于岩体的峰值应力会随着加载速率的增大而增大的规律<sup>[21-23]</sup>不一致，虽然



(a) T1



(b) T2

图 5 不同围压下 T1 和 T2 试样前后粒径含量变化

Fig. 5 Changes in particle size content of samples T1 and T2 under different confining pressures before and after the tests

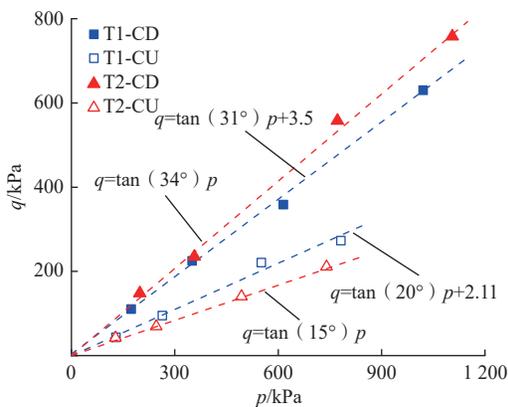


图 6 T1 和 T2 试样在不同试验条件下的 p-q 曲线

Fig. 6 p-q curves of samples T1 and T2 under different test conditions

也有研究提到岩体的峰值应力会随着加载速率的增大而减小<sup>[24-25]</sup>，但这主要是因为岩体内部的损伤积累，并不完全适用于土石混合体。对 T3 试样而言，计算其土石阈值为 15 mm，进而可得到其含石量在 40% 左右，该含石量下其强度往往取决于其中的土体、块石及两者的相互作用。加载速率较快时，试样内部的颗

表 1 不同试验条件下试样的强度参数

Table 1 Strength parameters of samples under different test conditions

S-RM 试样	试验工况			
	CD		CU	
	$c$ /kPa	$\varphi$ /(°)	$c$ /kPa	$\varphi$ /(°)
T1	3.50	31	2.11	20
T2	0	34	0	15

粒没有充足的时间发生滑移和旋转, 颗粒之间未能充分接触, 摩擦不能完全建立, 导致试样内部颗粒间的接触、咬合等作用表现出来的抗剪强度得不到充分发挥, 宏观表现为试样偏差应力的降低。此外, 加载速率高时, 由于颗粒间的作用不能充分发挥, 颗粒破碎也将降低, 因此而导致的颗粒间重排列而引起的体变也不能充分响应, 宏观表现为试样体缩的减小(图 4b)。

#### 4 结论

(1) 构成土石混合体的细粒土体成分对其物理力学性质有显著的影响。试验中的排水条件会影响土石混合体的力学行为及孔隙水压力消散过程, 从而影响其抗剪强度和体变; 在相近的含石量条件下, 固结排水条件下含砂土的土石混合体强度较含黏土的土石混合体强度要高, 而固结不排水条件下则反之。

(2) 土石混合体在外部荷载作用下将发生不同程度的颗粒破碎特征, 在高围压(600 kPa)下, T1、T2 试样 5 mm 颗粒的减小量均达到了 6% 左右。颗粒破碎将导致试样内部粒度级配的重分布, 从而影响试样的体变、强度等特征的演化。

(3) 加载速率会对土石混合体的强度有一定的影响。在 3.5 mm/min 的加载速率条件下, T3 试样的峰值偏差应力和峰值体变仅为 0.3 mm/min 加载速率条件下的 60% 左右。这是因为加载速率较高的情况下内部块石颗粒难以充分调整(位移、旋转及破碎)以抵抗外部荷载。

#### 参考文献 (References) :

[ 1 ] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 土石混合体微观结构及力学特性数值模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 300 - 311. [ XU Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi, et al. Mesostructural character and numerical simulation of mechanical properties of soil-rock mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 300 - 311. (in Chinese with English abstract) ]

[ 2 ] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义 [J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 50 - 56. [ XU Wenjie, HU Ruilin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4): 50 - 56. (in Chinese with English abstract) ]

[ 3 ] 许宵, 王顺, 李典庆, 等. 土石混合体边坡的稳定性与大变形破坏分析 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(12): 1501 - 1512. [ XU Xiao, WANG Shun, LI Dianqing, et al. Analysis of stability and large deformation failure of soil-rock mixture slopes[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(12): 1501 - 1512. (in Chinese with English abstract) ]

[ 4 ] GEERTSEMA M, CLAGUE J J, SCHWAB J W, et al. An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada[J]. Engineering Geology, 2006, 83(1/2/3): 120 - 143.

[ 5 ] 张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 等. 甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(5): 7 - 14. [ ZHANG Weixiong, ZHAI Xianghua, DING Baoyan, et al. Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 7 - 14. (in Chinese with English abstract) ]

[ 6 ] 岳中琦. 梅大高速公路路基边坡失稳条件与滑坡机理初探 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 1 - 12. [ YUE Zhongqi. Study on the instability condition and landslide mechanism of subgrade slope in Mei-Da Expressway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 1 - 12. (in Chinese with English abstract) ]

[ 7 ] YIN Yueping, LI Bin, WANG Wenpei, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization[J]. Engineering, 2016, 2(2): 230 - 249.

[ 8 ] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型 [J]. 地质论评, 2014, 60(4): 858 - 868. [ LIU Chuanzheng. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China[J]. Geological Review, 2014, 60(4): 858 - 868. (in Chinese with English abstract) ]

[ 9 ] 殷跃平, 李廷强, 唐军. 四川省丹巴县城滑坡失稳及应急加固研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 971 - 978. [ YIN Yueping, LI Tingqiang, TANG Jun. Landslide reactivation and emergency stabilization on Danba county town in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 971 - 978. (in Chinese with English abstract) ]

[ 10 ] 成浩, 韩培锋, 苏有文. 含石量和坡度对土石混合体崩塌运动规律的影响 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 11 - 23. [ CHENG Hao, HAN Peifeng, SU Youwen. Influence of rock content and slope on collapse in soil-rock accumulation[J]. The Chinese

- Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 11 – 23. (in Chinese with English abstract) ]
- [11] 邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜. 含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 111 – 115. [ SHAO Zhongrui, LUO Xuegui, GUO Nana. A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 111 – 115. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] VALLEJO L E. Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(5): 1097 – 1104.
- [13] 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. [ WU Hongbo, LI Zhanfu, JIANG Shan, et al. Numerical simulation of influence of rock content on shear characteristics of rock-rock mixture by particle flow[J]. Highway, 2023, 68(5): 274 – 282. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 李诗琪, 杨忠平, 刘浩宇, 等. 考虑间断级配影响的土石混合体水力侵蚀分异机理 [J/OL]. 土木工程学报, (2024-01-25) [2024-08-26]. [ LI Shiqi, YANG Zhongping, LIU Haoyu, et al. Hydraulic erosion differentiation mechanism of soil-rock mixture considering the effect of discontinuous gradation[J/OL]. China Civil Engineering Journal. (2024-01-25) [2024-08-26]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgxcb.23060525>. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 马丽娜, 乔丹阳, 王起才, 等. 不同配比土石混合体压实特性及颗粒破碎特征研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2023, 42(6): 62 – 71. [ MA Lina, QIAO Danyang, WANG Qicai, et al. Compaction characteristics and particle crushing characteristics of soil-rock mixtures with different proportions[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2023, 42(6): 62 – 71. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 刘宝臣, 张辉, 林志南, 等. 含石量及块石球度对土石混合体剪切特性的影响 [J/OL]. 工程科学与技术, (2024-06-18) [2024-08-26]. [ LIU Baochen, ZHANG Hui, LIN Zhinan, et al. Effect of stone content and particle sphericity on the shear characteristics of soil-rock mixtures [J/OL]. Advanced Engineering Sciences, (2024-06-18) [2024-08-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240617.1146.002.html>. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] XU W J, HU R L, TAN R J. Some geomechanical properties of soil-rock mixtures in the Hutiao Gorge area, China[J]. *Géotechnique*, 2007, 57(3): 255 – 264.
- [18] 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. [ XU Wenjie, HU Ruilin, TAN Rujiao, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of longpan in tiger-leaping gorge area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(6): 1270 – 1277. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 996 – 1007. [ XU Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi, et al. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(5): 996 – 1007. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [ Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for geotechnical testing method; GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese) ]
- [21] 张吉民, 马振乾, 张东岳, 等. 基于分形维数的三轴压缩下泥质粉砂岩力学特性研究 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(6): 115 – 120. [ ZHANG Jimin, MA Zhenqian, ZHANG Dongyue, et al. Study on mechanical properties of argillaceous siltstone under triaxial compression based on fractal dimension[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6): 115 – 120. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] FUENKAJORN K, KENKUNTHOD N. Influence of loading rate on deformability and compressive strength of three Thai sandstones[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28(5): 707 – 715.
- [23] 苏承东, 李怀珍, 张盛, 等. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 943 – 950. [ SU Chengdong, LI Huaizhen, ZHANG Sheng, et al. Experimental investigation on effect of strain rate on mechanical characteristics of marble[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5): 943 – 950. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] WANG Y, LI X, ZHENG B. Stress-strain behavior of soil-rock mixture at medium strain rates—Response to seismic dynamic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 93: 7 – 17.
- [25] 王永岩, 崔立桩, 葛强. 不同加载速率对类软岩三轴峰值强度的试验研究 [J]. 煤炭技术, 2020, 39(8): 30 – 32. [ WANG Yongyan, CUI Lizhuang, GE Qiang. Experimental study on triaxial peak strength of similar rock with different loading rates[J]. Coal Technology, 2020, 39(8): 30 – 32. (in Chinese with English abstract) ]