

# 考虑粒径比和粉粒含量影响的砂粉土力学特性试验研究

晏洲毅, 李雪菊

(辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001)

**摘要:** 砂粉土作为工程中常见的地基或建筑填料,其力学特性直接影响工程的安全与稳定性,其中粒径比和粉粒含量是两个重要的影响因素。为系统揭示砂粉土中粒径比与粉粒含量对其力学行为的影响机制,在三种粉粒含量条件下,针对四种不同粒径比的砂粉土开展了三轴排水与不排水试验。研究结果表明:在排水条件下,增大粒径比可显著提升砂粉土的抗剪强度与临界摩擦角,并有效抑制其剪缩变形;在不排水条件下,粒径比增大能够抑制孔隙水压力的发展,从而提高试样的抗液化能力。此外,无论在排水还是不排水条件下,粒径比对力学行为的影响均随其自身增大而逐渐减小;同时,随着粉粒含量的增加,粒径比的影响作用也在逐渐减小,表明粒径比与粉粒含量之间存在明显的耦合作用,二者共同决定了砂粉土的力学响应特征。

**关键词:** 砂粉土;粒径比;粉粒含量;三轴试验;力学特性

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2026)03—0163—06

## Experimental Study on Mechanical Properties of Sand-fine mixtures Considering the Influence of Particle Size Ratio and Fine Content

YAN Zhouyi, LI Xueju

(School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning 121001, China)

**Abstract:** As a common foundation or construction fill material in engineering, the mechanical properties of sand-fine mixtures directly affect the safety and stability of the project. Among them, the particle size ratio and the fine content are two important influencing factors. To systematically reveal the mechanism of the influence of particle size ratio and fine content on the mechanical behavior of sand-fine mixtures, under three powder particle content conditions, triaxial drained and undrained tests were conducted for four different particle size ratios of sand-fine mixtures. The research results show that under drained conditions, increasing the particle size ratio can significantly enhance the shear strength and critical friction angle of the sand-fine mixtures, and effectively inhibit its shear deformation. Under undrained conditions, an increase in the particle size ratio can suppress the development of pore water pressure, thereby improving the liquefaction resistance of the sample. Moreover, regardless of whether it is under drained or undrained conditions, the influence of the particle size ratio on the mechanical behavior gradually decreases as the particle size ratio increases; at the same time, with the increase in the fine content, the influence of the particle size ratio also gradually decreases, indicating that there is a clear coupling effect between the particle size ratio and the fine contents, and the two jointly determine the mechanical response characteristics of the sand-fine mixtures.

**Keywords:** sand-fine mixtures; size ratio; fine content; triaxial tests; mechanical properties

砂粉土作为自然界中广泛分布的一类典型无黏性颗粒材料<sup>[1-2]</sup>,其颗粒级配介于砂土与粉土之间,常被用作路基、土石坝、海岸堤防等工程的地基或建筑材料,其力学行为直接关系到工程的安全性、稳定性与长期服役性能,一直是岩土工程领域的重要研究对象<sup>[3-5]</sup>。与单一粒径组分的砂土或粉土相比,砂粉土在颗粒组成、孔隙结构及颗粒间相互作用方面具有明显的非均质性和耦合特性,导致其力学行为更为复杂<sup>[6-7]</sup>。

砂粉土的力学特性受多种因素影响,包括相对密度、粉粒含量、应力状态、排水条件、粒径比以及颗粒组构等<sup>[8-11]</sup>。其中,粉粒含量(Fine content, FC)与粒径比(Size ratio, SR)是两个最为关键的参数,二者共同控制着土体的颗粒级配特征、孔隙分布形态以及颗粒接触网络,进而影响其强度特性、变形行为与渗透性能。近年来,不少学者围绕上述影响因素开展了系统研究<sup>[12-14]</sup>。例如,左康乐等<sup>[15]</sup>探讨了不同粒径比条件下砂粉土的液化特性,建立了抗液化强度与小应变剪切模量之间的关联,并分析了不同因素对抗液化强度与等效骨架孔隙比关系的影响。董林等<sup>[16]</sup>研究了粉粒含量对砂粉土液化势的影响,发现随着粉粒含量增加,土体的抗液化能力呈现先增强后减弱的非单调变化趋势。在此基础上,孙小宸等<sup>[17]</sup>进一步提出了一种基于液化势演变特征的砂粉土抗液化性能评价方法,为工程中的液化风险精细化评估提供了新思路。此外,吴彦燊等<sup>[18]</sup>通过开展不同相对密度与粉粒含量下砂粉土的不排水试验,系统揭示了粉粒含量与密实状态对不排水剪切行为及其破坏模式的耦合作用机制。

然而,当前研究多集中于单一变量(如仅考虑粉粒含量变化或仅考虑粒径比变化)对砂粉土力学行为的影响,而同时考虑粉粒含量与粒径比变化的研究仍较为缺乏。在实际工程中,二者常同时变化并共同作用,忽略其耦合效应可能导致对砂粉土力学响应判断的偏差。因此,系统揭示粉粒含量与粒径比对砂粉土力学特性的耦合影响规律,对于准确评价该类土体在静动力荷载作用下的强度、变形及液化特性具有重要的理论意义与工程价值。

为此,本文通过设计并开展系统的室内三轴试验,研究粉粒含量与粒径比的联合变化对砂粉土力学行为的耦合控制机理。试验共设置 3 种粉粒含量与 4 种粒径比组合,分别进行排水(CD)与不排水(CU)三轴剪切试验,综合分析试样的应力-应变关系、强度特性、变形模式及孔隙水压力演化规律。

## 1 试验材料与方法

试验选用 1 种粉与 4 种不同粒径规格的砂进行混合配制。通过控制粉粒质量含量分别为 10%、30%与 70%,并结合 4 种砂粒级配,共制备出 12 种级配的砂粉土试样。砂和粉的级配分布如图 1 所示。表 1 列出了试验材料的基本物理参数。

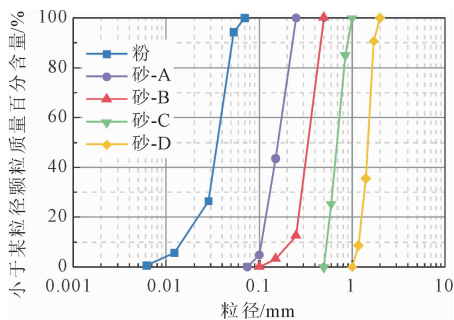


图 1 级配曲线

表 1 材料参数

试验材料	粉	砂-A	砂-B	砂-C	砂-D
$D_{50}/\text{mm}$	0.037	0.142	0.338	0.693	1.460
比重	2.653	2.642	2.654	2.642	2.640

试验采用 GDS 三轴测试系统进行,该系统可精确控制多种复杂应力路径下的加载过程。试样为圆柱形,直径为 50 mm,高度为 100 mm。采用湿捣法制备试样,该方法能有效制备初始相对疏松且保持砂与粉粒分布均匀的试样,避免颗粒分离。具体制备步骤包括:首先,按照预设质量比例称取烘干后的粗砂与粉粒材料,加入相当于其总质量 5% 的蒸馏水,充分拌和均匀;随后,将混合料分 5 层填入圆柱形模具中,每层使用夯实装置均匀压实至约 20 mm 厚度。制备完成的试样形态如图 2 所示。



图 2 制备完成的试样

试样制备完成后,进行饱和处理。饱和程序包括:首先自试样底部通入二氧化碳( $\text{CO}_2$ )气体,以置换试样孔隙内的空气;随后在保持 20 kPa 负压的条件下拆除模具,以维持试样形态稳定;接着将试样安装至压力室,从试样底部持续注入蒸馏水,置换孔隙内的  $\text{CO}_2$ ;之后采用逐级增压法施加围压与反压,期间保持有效围压恒定为 20 kPa,直至反压升至 200 kPa;此后维持围压与反压稳定,直至实测饱和度达到 0.98 以上,判定为饱和完成。本试验中有效围压定义为围压与反压之差。

饱和完成后,对所有试样施加 100 kPa 有效围压进行各向同性固结,当试样体积变化趋于稳定时视为固结完成。加载阶段采用应变控制模式,加载速率统一设定为 0.1 mm/min。其中,排水三轴试验(CD)加载至轴向应变达到 20%,不排水三轴试验(CU)加载至轴向应变达到 15%。本次研究共计开展 CD 试验 12 组、CU 试验 12 组,总计 24 组试验,具体试验方案见表 2,其中粉粒含量表示的是细颗粒占整体的质量百分数,粒径比表示的是粗颗粒与细颗粒直径的比值。

表 2 试验方案

试验类型	粉粒含量/%	粒径比
CD	10、30、70	3.8、9.1、18.7、39.4
CU	10、30、70	3.8、9.1、18.7、39.4

## 2 试验结果与分析

### 2.1 排水三轴试验结果

图 3 给出了不同粒径比条件下砂粉土试样在排水三轴剪切试验中的应力-应变关系曲线。由图 3 可知,所有试样在剪切初期均表现出偏应力随轴向应变迅速上升的趋势,随后逐渐趋于稳定,最终进入临界状态,呈现出典型的应变硬化特征,反映出试验初始状态均为相对松散结构。进一步分析发现,在三个不同粉粒含量水平下,随着粗颗粒与细颗粒粒径比的增大,试样在剪切过程中的偏应力增长速度均显著提高。这说明粒径差异的增大强化了颗粒间的几何约束与力学互锁作用,使得试样在承受相同轴向变形时能够承担更高的偏应力,从而显著提升了材料的宏观抗剪强度。

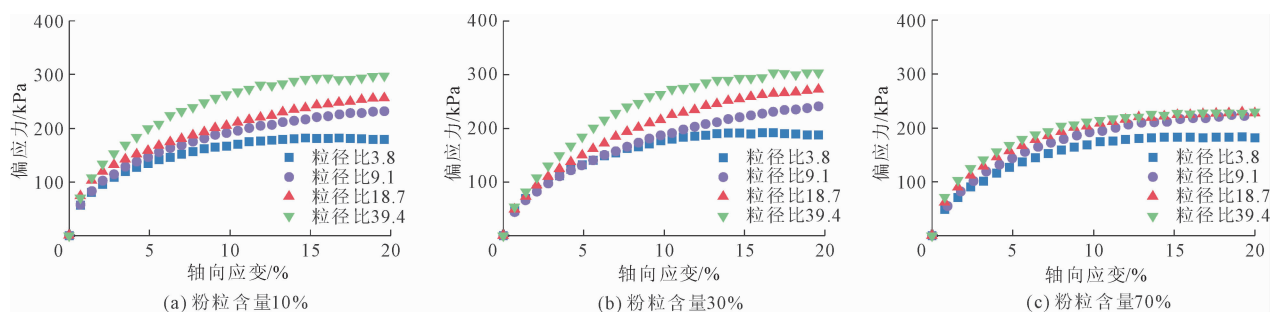


图 3 排水三轴试验应力-应变关系曲线

图 4 给出了临界摩擦角随颗粒粒径比演化的规律。由图 4 可知,临界摩擦角随粒径比的增加呈单调递增趋势,但增长率随粒径比的增大逐渐降低,表明粒径比对临界摩擦角的强化效应是随粒径比的增大而减小的。同时,粉粒含量对临界摩擦角的影响呈现显著的非单调性:在粉粒含量较低时,临界摩擦角随粉粒含量增加而上升,说明适量细颗粒可增强颗粒间的咬合与接触力链稳定性;而当粉粒含量超过某一阈值后,临界摩擦角转而下降,这表明过量细颗粒的介入会逐渐侵入并削弱粗颗粒骨架的结构完整性,导致颗粒体系的整体稳定性和宏观抗剪性能降低。由此可见,临界摩擦角由粒径比与粉粒含量共同决定,二者通过改变颗粒体系的级配结构与相互作用方式从而影响临界摩擦角。

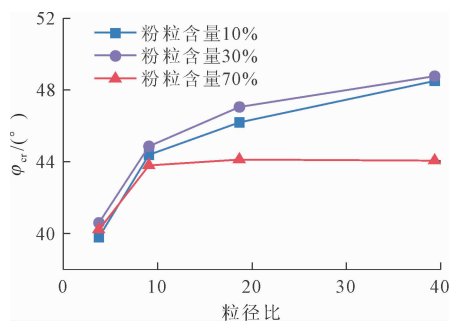


图 4 临界摩擦角

图 5 给出了排水三轴试验的体变曲线。由图 5 可知,所有试样在剪切过程中均表现出持续的体积收缩(剪缩),并在达到临界状态后体变趋于稳定。值得注意的是,在 3 个粉粒含量条件下试样的剪缩

程度均随粒径比的增大而显著降低。这一规律表明,粒径差异的增大有效抑制了材料在受剪过程中的体积压缩。从细观机制角度分析,粒径比的增加意味着粗、细颗粒尺寸差异扩大,从而增强了粗颗粒骨架的稳定性与颗粒间的几何咬合作用。这种结构

效应限制了剪切过程中颗粒的重新排列与孔隙的压缩空间,因此宏观上表现出剪缩程度的减弱。该结果进一步说明,通过调整颗粒体系的粒径组成,可有效调控砂粉土在剪切过程中的体积变形特性。

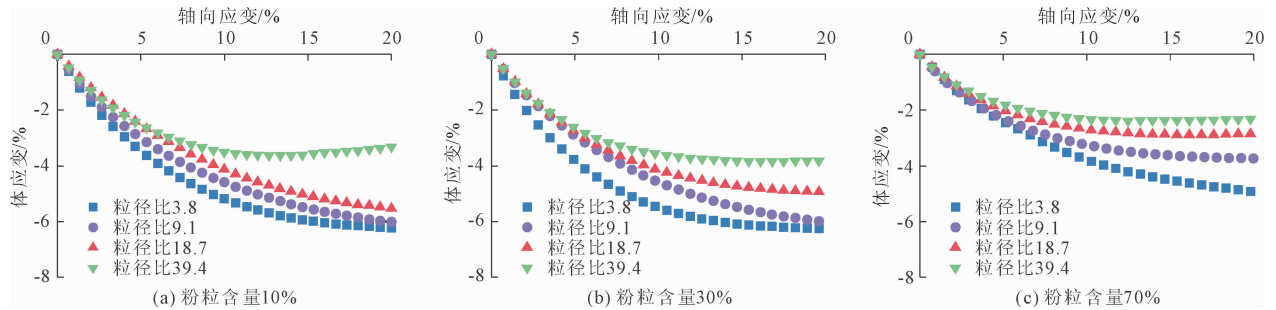


图 5 排水三轴试验体变曲线

2.2 不排水三轴试验结果

图 6 和图 7 为不排水条件下的试验结果,从图中可以看出,砂粉土不排水条件下的力学行为同样受到粒径比和粉粒含量的影响。在剪切过程中,试样普遍表现为偏应力随轴向应变快速上升、达到峰值后逐渐下降,最终趋于液化或稳定残余强度的变化趋势。当粉粒含量为 10% 与 30% 时,随着粒径比增大,试样的残余强度明显提高,表明其抗液化能力

逐步增强。这一现象说明,通过调节颗粒级配、扩大粒径差异,可有效增强砂粉土在不排水剪切过程中的结构性抵抗能力,抑制液化发展;而在粉粒含量达到 70% 的高粉粒含量条件下,试样的残余强度始终维持在较低水平,且基本不随粒径比变化。表明在高粉粒含量体系中,细颗粒已形成主导性基质,粗颗粒间的骨架作用被显著削弱,此时材料的力学行为主要由细粒控制,粒径比对整体响应的影响趋于弱化。

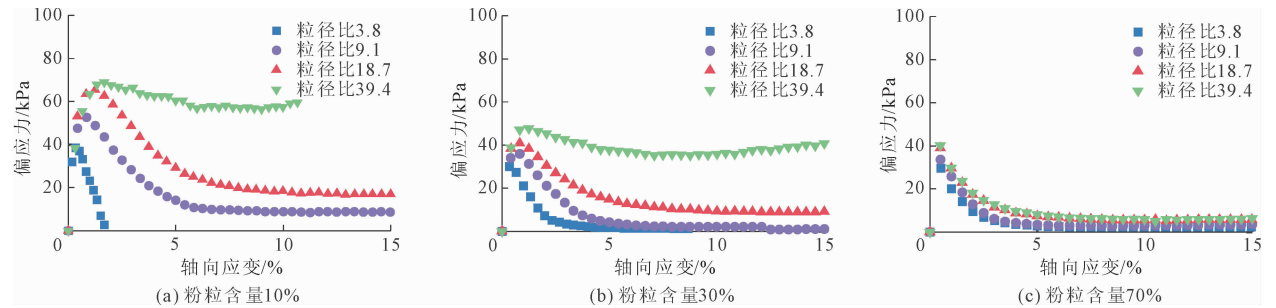


图 6 不排水试验应力-应变关系曲线

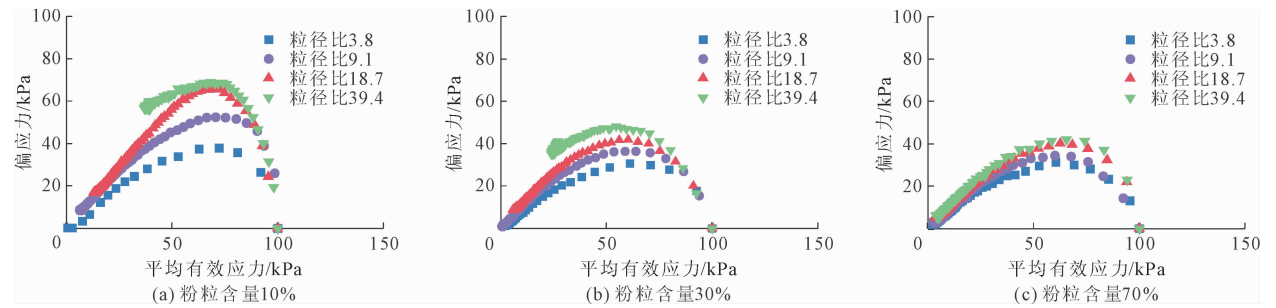


图 7 不排水试验应力路径

为进一步揭示不排水条件下砂粉土的强度特性,图 8 给出了不同粉粒含量试样峰值偏应力随粒

径比的变化规律。由图 8 可知,在相同粉粒含量下,峰值偏应力随粒径比的增大呈单调递增趋势,但其

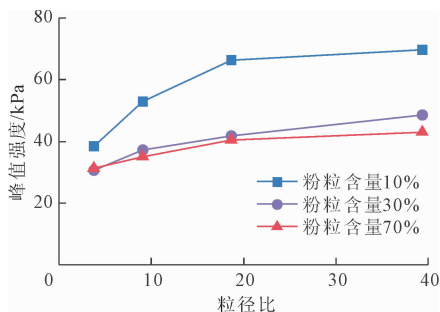


图 8 不排水试验峰值偏应力

增长率随粒径比增加逐渐降低,表明粒径比对材料峰值强度的增强效应随着粒径差异的扩大而趋于减弱。同时,粉粒含量对峰值偏应力亦具有显著影响:在相同粒径比条件下,峰值偏应力随粉粒含量增加而持续降低,这与完全排水条件下的响应特征有所不同,表明不排水路径下,高粉粒含量所引起的孔隙水压力累积效应,显著削弱了颗粒骨架的承载效率,

从而降低了体系的峰值强度。该结果进一步说明,砂粉土的不排水峰值强度由粒径比与粉粒含量共同作用,且受细粒含量所主导的孔隙水压力响应机制显著影响。

图 9 进一步给出了不排水剪切过程中孔隙水压力的演化曲线,可以看出,所有试样在剪切初期即出现孔隙水压力持续上升的现象,对应于应力路径中平均有效应力的逐步降低。随着粒径比增大,孔隙水压力的累积速率及最终稳定值均呈现下降趋势,这验证了提高粒径比有助于增强砂粉土的抗液化性能。值得注意的是,粒径比对孔隙水压力发展的影响程度随粉粒含量变化而显著不同。在低粉粒含量条件下,粒径比增大对抑制孔隙水压力发展的作用较为明显;随着粉粒含量增加,该抑制效果逐渐减弱。当粉粒含量达到 70% 时,不同粒径比试样的孔隙水压力演化曲线趋于一致,说明此时粒径比的变化已不再对孔隙水压力发展产生显著影响。

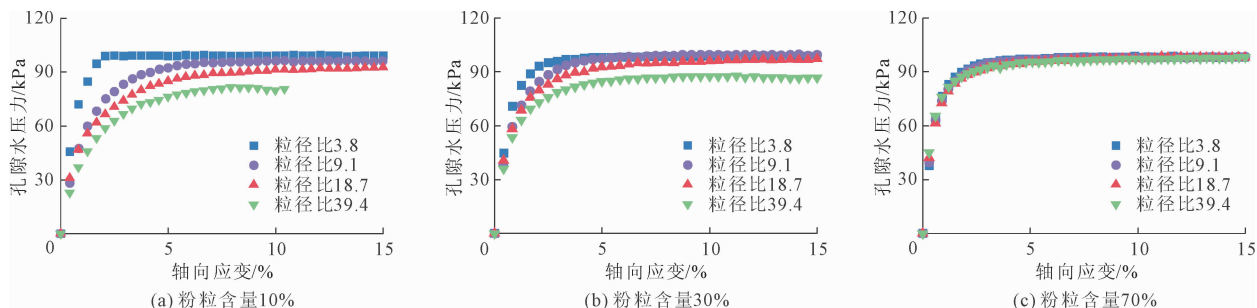


图 9 不排水试验孔隙水压力演化

### 2.3 粒径比和粉粒含量的耦合作用

从前两节的分析结果可知,无论是在排水还是在排水条件下,随着粉粒含量增加,粒径比变化对砂粉土宏观力学行为的影响逐渐减弱。该趋势在排水试验中的抗剪强度与临界摩擦角、以及不排水三轴试验中的偏应力响应与孔隙水压力变化等方面均得到一致验证。为定量表征该规律,以粒径比 3.8 时试样的抗剪强度为基准进行归一化处理(取为 1),分析不同粒径比对试样抗剪强度的影响程度,结果如表 3 所示。由表 3 可见,在排水三轴试验中,当粉粒含量由 10% 增至 70% 时,粒径比为 39.4 试样的归一化抗剪强度由 1.68 降至 1.25;不排水三轴试验中呈现相似规律,对应粒径比下试样的归一化抗剪强度由 1.81 降至 1.37。

粒径比的影响随粉粒含量的增加而减弱主要与混合物中颗粒骨架主导作用的转变有关。在低粉粒含量范围内,粗颗粒构成稳定的骨架结构,混合物的

表 3 粉粒含量和粒径比对抗剪强度的耦合作用

试验类型	粉粒含量/%	粒径比			
		3.8	9.1	18.7	39.4
排水三轴试验	10	1	1.32	1.47	1.68
	30	1	1.28	1.45	1.63
	70	1	1.23	1.26	1.25
不排水三轴试验	10	1	1.37	1.72	1.81
	30	1	1.21	1.37	1.58
	70	1	1.12	1.29	1.37

力学响应主要由粗颗粒间的相互作用控制,粒径比变化会显著影响骨架的空间排列与力链传递,进而引起力学性质的明显差异。而随着粉粒含量增加,细颗粒逐步填充粗粒骨架孔隙甚至逐渐取代其结构作用,试样的行为逐渐向细粒土特征趋近,此时力学性质更多受到细颗粒特性的影响。本研究中粒径比的改变是通过固定细粒粒径、调整粗粒粒径实现的。因此在粉粒含量较高时,不同粒径比试样的力学性

质主要由同一细粒组分主导,粗粒粒径变化对整体结构的影响被大幅抑制,从而导致粒径比影响的敏感性下降。综上所述,在评价粒径比对砂粉土力学特性的影响时,除关注粒径比数值外,还需结合粉粒含量与粒径调节方式,系统分析颗粒骨架的角色转变及其对宏观响应的控制机制。

### 3 结 论

本文在 3 个粉粒含量水平下对 4 种不同粒径比的砂粉土开展了系统的三轴排水和三轴不排水试验,研究了粉粒含量和粒径比对砂粉土力学特性的影响,主要得到以下结论:

(1) 在排水条件下,增大粒径比可显著提升砂粉土的抗剪强度与临界摩擦角,并有效抑制其剪缩趋势。粗、细颗粒尺寸差异的扩大有助于增强颗粒骨架的承载能力。在不排水剪切条件下,粒径比的增大能够抑制孔隙水压力的发展,进而提高试样的抗液化能力。

(2) 无论在排水还是不排水条件下,粒径比对砂粉土力学行为的影响均随其自身增大而趋于缓和,表现出显著的边际效应。

(3) 粒径比和粉粒含量的作用是相互耦合的,随着粉粒含量的增加,粒径比增大对砂粉土的力学行为的影响逐渐减小。这一现象归因于本试验通过调整粗颗粒粒径来控制粒径比的变化。因此,在评估砂粉土的力学行为时,不仅粒径比本身,而且粒径比变化的来源同样重要。

#### 参考文献:

- [1] 吴 琪,陈国兴,周正龙,等. 基于颗粒接触状态理论的粗细粒混合料液化强度试验研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(03):475-485.
- [2] 孙增春,刘汉龙,肖 杨. 砂-粉混合料的分阶塑性本构模型[J]. 岩土工程学报,2024,46(08):1596-1604.
- [3] Adesina P, O Sullivan C, Wautier A. The influence of particle size ratio on the mechanical behaviour of gap-graded granular assemblies under drained triaxial compression: A DEM study[J]. Computers and Geotechnics, 2025,179:106987.
- [4] 何国顺,刘 飞,程 阳,等. 降雨条件下不同细粒含量粉砂土边坡稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(03):36-41.
- [5] Yilmaz Y, DENG Yibing, Chang C S, et al. Strength-dilatancy and critical state behaviours of binary mixtures of graded sands influenced by particle size ratio and fines content[J]. Géotechnique, 2023,73(03):202-217.
- [6] Tafili M, Knittel L, Gauger V, et al. Experimental study on monotonic to high-cyclic behaviour of sand-silt mixtures[J]. Acta Geotechnica, 2024,19(07):4227-4240.
- [7] Mahmoudi Y, Cherif Taiba A, Belkhatir M, et al. Characterization of mechanical behavior of binary granular assemblies through the equivalent void ratio and equivalent state parameter[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2022,26(07):2869-2897.
- [8] 王 涛,朱俊高,刘斯宏. 不同细料含量土石混合料塑性行为离散元模拟[J]. 力学学报,2022,54(04):1075-1084.
- [9] Yan Zhouyi, Liu Yang. Investigation of the macro-and micro-mechanical behaviors of binary mixtures under proportional strain loading path via DEM simulation [J]. Computational Particle Mechanics, 2025,12(05):2929-2967.
- [10] Yan Zhouyi, Liu Yang, Zhao Debin. Instability of binary mixtures subjected to constant shear drained stress path: Insight from macro and micro perspective[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2024,48(16):3997-4013.
- [11] 吕玺琳,翁淼森,蔡剑韬,等. 细粒含量对饱和砂土静态液化失稳特性影响的三轴试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2021,49(08):1128-1134.
- [12] 吴 琪,杨铮涛,刘 抗,等. 细粒含量对饱和珊瑚砂动力变形特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(08):1386-1396.
- [13] 吴尚杰. 粉土填料细观剪切特性的颗粒离散元数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(03):129-133,175.
- [14] Adesina P, Wautier A, Benahmed N. A micromechanics-based classification of the regimes delineating the behaviour of gap-graded soils [J]. Computers and Geotechnics, 2024,168:106165.
- [15] 左康乐,顾晓强. 不同粒径比下含细颗粒砂土液化特性的试验研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(07):1461-1470.
- [16] 董 林,彭皓皓,夏 坤,等. 粉粒含量对砂性土液化势影响试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2025,45(06):215-224.
- [17] 孙小宸,宿利平,刘 洋. 基于液化势指标的砂土抗液化评价方法及应用[J]. 工程地质学报,2023,31(02):671-679.
- [18] 吴彦燊,徐博远,刘 璐,等. 砂-粉混合料不排水剪切相变强度特性试验研究[J]. 人民长江,2025,56(01):187-192.