细粒含量对铁尾矿静态液化特性的影响*

李武，许强，任凯驿

（成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室， 四川 成都 610059）

摘要：细粒含量对土体静态液化特性的影响机制较为复杂，且深受土体性质的影响。鉴于长江上游的攀枝花地区存在大量铁尾矿库，深入理解其静态液化特性对于确保尾矿库的安全至关重要。因此，为探究不同细粒含量对攀枝花地区铁尾矿静态液化特性的影响，采用固结不排水三轴试验，对细粒含量为0、20%、40%、60%、100%的铁尾矿进行研究，主要分析细粒含量对铁尾矿应力-应变行为、静态液化潜势和临界状态线的影响。试验结果表明：细粒含量对铁尾矿的静态液化特性具有显著影响；铁尾矿抗液化能力随细粒含量增加表现为先增加、后减小、再增加的复杂趋势，在该过程中存在两个阈值，其阈值会随着围压的增加而减小；由临界状态线可知，攀枝花铁尾矿在细粒含量为60%时最易液化。研究可为深入理解攀枝花地区铁尾矿库的静态液化特性提供参考。

关键词：铁尾矿；静态液化；细粒含量；三轴试验

中图分类号：TD854.6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)11-0191-07

Impact of Fine Grain Content on Static Liquefaction Characteristics of Iron Tailings

LI Wu, XU Qiang, REN Kaiyi

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The influence mechanism of fine grain content on static liquefaction characteristics of soil is complex and deeply affected by soil properties. In view of the large number of iron tailings reservoirs in the Panzhihua area in the upper reaches of the Yangtze River, an in-depth understanding of their static liquefaction characteristics is essential to ensure the safety of tailings reservoirs. Therefore, in order to explore the influence of different fine grain contents on the static liquefaction characteristics of iron tailings in Panzhihua area, the iron tailings with fine grain contents of 0, 20%, 40%, 60% and 100% were studied by consolidated undrained triaxial test. The influence of fine grain content on the stress-strain behavior, static liquefaction potential and critical state line of iron tailings were analyzed. The test results show that the fine grain content has a significant effect on the static liquefaction characteristics of iron tailings. The anti-liquefaction ability of iron tailings increases first, then decreases, and then increases with the increase of fine grain content. There are two thresholds in this process, and the threshold decreases with the increase of confining pressure. According to the critical state line, Panzhihua iron tailings are most easily liquefied when the fine grain content is 60%. This study can provide a reference for further understanding the static liquefaction characteristics of iron tailings reservoirs in Panzhihua area.

Key words: Iron tailings, Static liquefaction, Fine grain content, Triaxial test

0 引言

四川攀枝花地区是我国主要铁矿资源出产地，建立了大量的铁尾矿库，如万年沟尾矿库、马家田尾矿库等[1-2]。尾矿库是矿石开采与选矿过程中产生的废弃物的主要堆积场所，因其高度和质量形成的高势能，存在溃坝的风险。溃坝一旦发生，不仅直接威胁到下游人民的生命财产安全，而且会伴生相应的环境和灾害问题[3-4]。例如，巴西的Herculano、Fundão、Feijão尾矿坝，南非Jagersfontein大坝的溃坝事件，均造成了重大的人员伤亡和环境破坏[5-6]。特别是由静态液化导致的尾矿库溃坝，因其具有难以预测和突然发生的特点，所以更具危险性[7-8]。因此，深入研究攀枝花地区铁尾矿的静态液

* **收稿日期**：2024-12-10

基金项目：国家自然科学基金项目(41630640,41790445)；国家重点研究发展计划项目(2022YFC3003205)

作者简介：李武(1999—)，男，四川南充人，硕士研究生，主要从事铁尾矿静态液化研究。E-mail:1457867235@qq.com

通信作者：许强(1968—)，男，四川巴中人，教授，博士生导师，主要从事斜坡变形破坏理论与防治技术研究。E-mail:xq@cdut.edu.cn

化特性尤为重要,可以为尾矿库的安全运行提供科学依据。

静态液化是指在单调加载或纯静荷载作用下,土体孔隙水压力上升,同时有效应力急剧降低甚至降低至零,进而导致土颗粒丧失抵抗剪切能力的一种现象。静态液化受初始孔隙比、加载模式、细粒含量等多种因素影响,其中,细粒含量是影响土体静态液化的一个重要因素[9-10]。目前,国内外学者已广泛深入研究了土体内不同细粒含量条件下的静态液化特性,并取得了不同程度的进展。但就细粒含量如何影响不同土体静态液化特性的问题,国内外学者尚未形成一致的认识,存在着一定的分歧与争议。YEH[11]、DEZFULIAN[12]、KAUFMAN 等[13]发现细粒含量的增加会增强粉砂的抗液化能力。AMINI 等[14]通过湿润夯实和沉积两种不同的制样方法,对细粒含量在 10%至 50%之间的不同砂质土壤进行了液化性能研究,发现细颗粒含量越大,粉砂抗液化性能越好。KWA 等[15]通过不同条件下的三轴试验,发现不同细粒含量的金属矿石抗液化能力随细粒含量的增加而增加。然而,这与 SHEN 等[16]、VAID[17]、YAMAMURO 等[18]学者的结论相悖,其研究指出,细粒含量的增加会削弱粉砂的抗液化能力。BAYAT 等[19]对 0~20%非塑性细粒含量的砂土抗液化性能进行研究,发现随着非塑性细粒含量的增加,其未排水残余强度降低,抗液化能力逐渐减弱。巫尚蔚等[20]通过室内试验和离散元模拟研究了粉粒含量对尾矿力学特性的影响,发现尾矿的抗液化强度会随着粉粒含量的增长而逐步降低。吕玺琳等[21]针对不同细粒含量饱和砂土的研究表明,细颗粒砂土含量越高,越易发生静态液化失稳。此外,LAW 等[22]与 KOESTER[23]则提出了更为复杂的观点,认为土体抗液化能力与细粒含量的关系并非单调增减,而是存在先降后升的趋势。张超等[24]通过铜尾矿坝尾砂的动三轴试验对细粒含量对静态液化的影响进行了研究,发现细粒含量在 35%左右时,尾矿坝具有最好的抗液化能力。陈振鹏[25]与胡再强等[26]通过三轴不排水试验研究了不同细粒含量对金尾矿静态液化的影响,发现尾矿的液化潜势会随着细粒含量的增加先下降后上升,当细粒含量达到 30%时最易液化。可见,细粒含量对土体静态液化能力的影响机制较为复杂,试验材料不同,导致的试验结果也会存在明显差异。鉴于攀枝花地区拥有大量铁尾矿库,且铁尾矿作为一类特殊的材料,细粒含量如何影响其静态液化特性的研究相对匮乏,亟需进一步研究。

因此,本文以攀枝花地区铁尾矿为研究对象,对不同细粒含量的铁尾矿静态液化特性展开研究。通过制备不同细粒含量(0、20%、40%、60%、100%)的铁尾矿试样,采用固结不排水三轴试验,并依据不排水脆性指数、液化势指数和临界状态线分析攀枝花地区不同细粒含量铁尾矿的应力-应变行为、静态液化潜势。该研究可以为攀枝花地区预防铁尾矿静态液化提供科学依据,进而降低铁尾矿库溃坝的风险,确保区域安全与环境稳定。

1 试验概况

1.1 试验材料

本试验所采用的尾矿取自攀枝花地区铁尾矿库。依据《土工试验规程》规范,将烘干后的铁尾矿先过 2 mm 孔径筛网,筛下材料即为试验用土,再将试验用土过 0.075 mm 孔径筛网,筛选出细粒尾矿。不同细粒含量根据细粒干质量占整个试样干质量的百分比来确定。对配置的不同细粒含量铁尾矿进行了粒径分布测试以及基本物理性质测试,级配曲线详见图 1(图中细粒含量简写为 FC,即 FC20 表示细粒含量为 20%),物理性质参数详情见表 1。当细粒含量为 40%时,铁尾矿的不均匀系数大于 5,曲率系数在 1~3 之间,粒径大小不均匀,级配良好;而其他细粒含量铁尾矿则颗粒连续性差,级配不良。此外,通过 X 射线衍射(XRD)对 FC0 与 FC100 的矿物成分进行了检测。由于不同细粒含量铁尾矿均由 FC0 与 FC100 按比例配置,所以仅检测了以上两种铁尾矿的矿物成分。两种粒径的矿物成分类似,其中含量最丰富的矿物为斜长石,其次是绿泥石,并存在少量的磁铁矿、钛铁矿等,详细矿物成分见图 2。

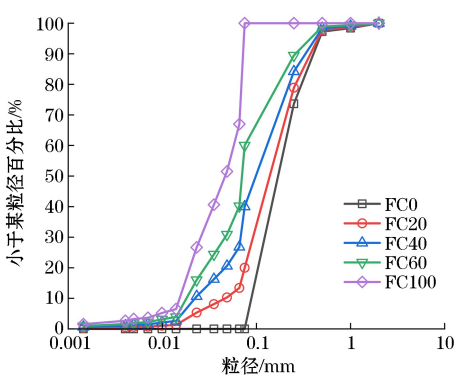


图 1 不同细粒含量铁尾矿粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of iron tailings with different fine grain contents

表 1 不同细粒含量铁尾矿物理性质

Table 1 Physical properties of iron tailings with different fine grain contents

试样编号	密度/(g/cm³)	不均匀系数	曲率系数	最小孔隙比	最大孔隙比	液限/%	塑限/%
FC0	2.975	2.282	0.873	0.531	1.081	13.488	—
FC20	2.976	3.633	1.061	0.442	0.849	12.943	—
FC40	3.000	5.813	1.567	0.362	1.026	22.910	12.720
FC60	3.019	4.153	1.628	0.481	1.256	25.794	15.063
FC100	3.055	3.780	0.735	0.525	1.620	22.008	11.588

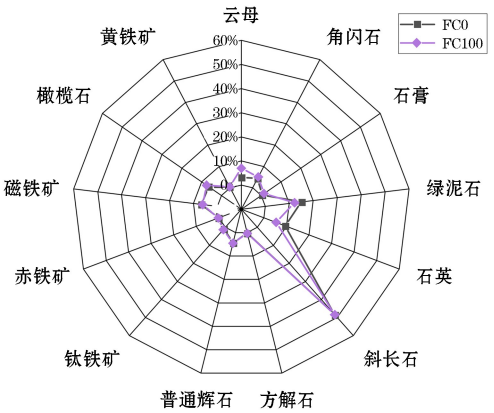


图 2 FC0、FC100 的矿物成分

Fig.2 Mineral composition of FC0 and FC100

1.2 试验程序及方案

不同细粒含量铁尾矿按照含水率 9%进行配比,随后采用静压法分四层进行制样,在每一层击实后都进行刮毛处理,防止出现断层边界,以确保试样的均匀性和整体性。制备完成的试样尺寸为 Φ39.1 mm×80 mm,孔隙比为 0.9。将制备完成的试样装入三轴剪切仪中。为确保试样得到较高的饱和度,采用了 LADE 等[27]提出的二氧化碳技术。首先,试样至少被 CO_2 处理 120 min,以确保将试样中空气置换。其次,采用注水的方式对试样进行水头饱和,直至孔压系数超过 0.95,则视为完全饱和。最后,对完全饱和的试样进行固结与剪切,剪切速率为 0.08 mm/min 且最大轴向应变为 20%。

本研究旨在探讨不同细粒含量条件下铁尾矿静态液化过程。分别配置了细粒含量为 0、20%、40%、60%、100%的 5 种土样,并在 100 kPa、200 kPa、400 kPa、600 kPa 围压下进行不排水三轴试验。

2 不同细粒含量铁尾矿静态液化特性研究

2.1 应力-应变关系

图 3 展示了 600 kPa 围压条件下,不同细粒含量铁尾矿的应力-应变关系、孔压-应变关系以及应力路径的变化。由图 3 可知,在剪切过程中,试样存在 2 个特征状态:峰值状态与临界状态。试样的峰值强度随着细粒含量的增加呈现先下降后上升的趋势,在细粒含量达到 60%时,峰值强度达到其最小值。此外,残余强度也呈现出一定的规律性,随着细粒含量的增加呈现出先增加、后降低、再上升的趋势。其中,FC60、FC100 的残余强度接近,FC20 的残余强度最大,表明其抗液化能力最强;相反,FC40 的残余强度最低,因此最易液化。而临界状态需借助临界状态线进行深入探讨,具体见2.4节。

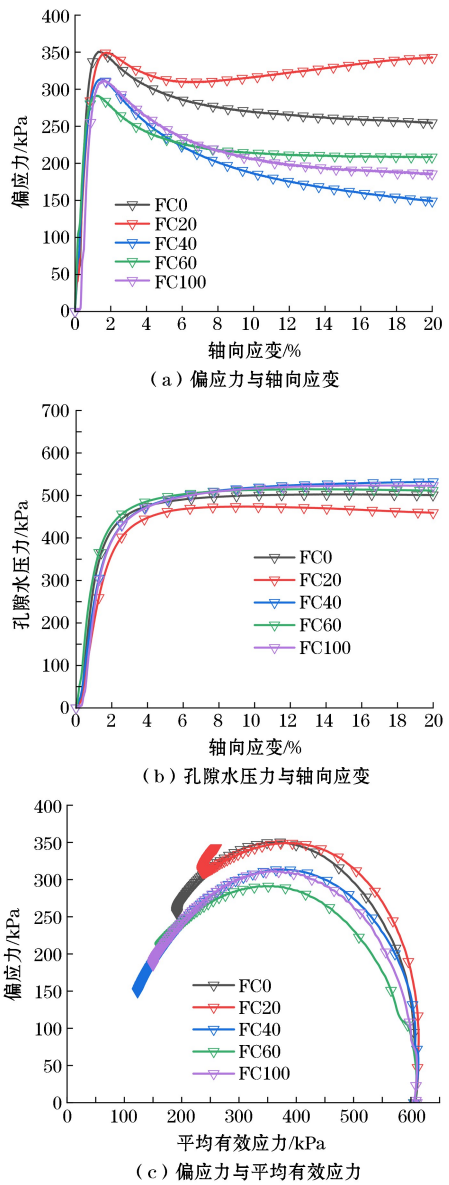


图 3 不同细粒含量试样的不排水三轴试验曲线

Fig.3 Undrained triaxial test curves of samples with different fine grain contents

不同试样在 600 kPa 围压下的应力-应变关系不同。FC20 表现为应变软化-硬化特性。在轴向应变为 2%时,FC20 试样的偏应力达到峰值,此时,孔隙水压力也开始逐渐上升,在轴向应变超过 2%后逐渐达到其峰值。随后,随着轴向应变的继续增加,FC20 的偏应力逐渐下降,直至轴向应变达到 6%时降至最低点。在这一应变区间内,孔隙水压力则呈现出相对稳定的趋势。紧接着,FC20 偏应力开始回升,而孔隙水压力则相应减小,这一变化在偏应力-平均有效应力曲线中表现为曲线出现转折,表明试样从剪缩状态向剪胀状态进行转变。除 FC20 以外,其他试样均表现为应变软化特性。在轴向应变小于 2%时,试样的偏应力迅速达到峰值,随后逐渐下降,此时,孔隙水压力也在持续增加,且随着轴向应变的进一步扩大,二者逐渐稳定。在整个剪切过程中,试样一直处于剪缩状态,未出现剪胀现象。

2.2 不排水脆性指数

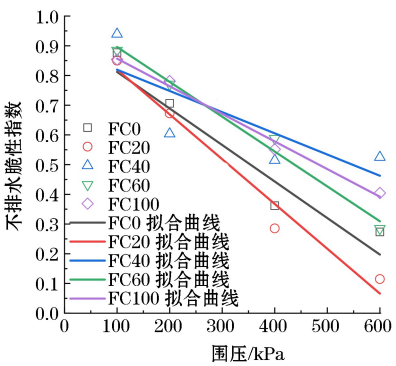
不排水脆性指数 I_B 可以评价不同试样应变软化情况,实现对峰值后偏应力的衰减定量表征,定义为:

$$I_B=\frac{q_p-q_{cs}}{q_p}$$

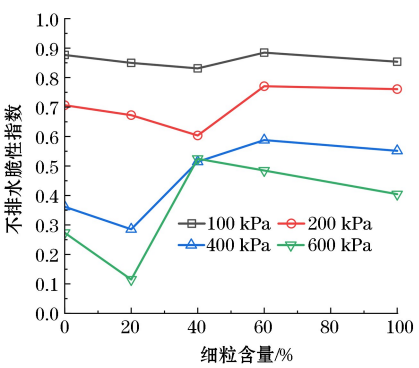
式中:q_p 为峰值偏应力;q_{cs} 为临界偏应力。在 I_B 为 1 时,试样的临界偏应力则为 0,即完全静态液化。当 I_B 为 0 时,试样表现为应变硬化型,不会发生静态液化。

图 4 为不同细粒含量尾矿的不排水脆性指数变化曲线。不排水脆性指数的取值区间为 0.11～0.93。由图 4(a)可知,铁尾矿试样的不排水脆性指数随着固结围压的增大而逐渐降低,表明在低围压条件下,试样更容易发生静力液化,而高围压则有助于降低其液化潜力。从不同细粒含量曲线斜率角度分析,相对于其他细粒含量,在细粒含量为 40%、100%时,围压对铁尾矿不排水脆性指数的影响较小。

由图 4(b)可知,不同固结围压下,铁尾矿抗液化能力随细粒含量的增加均表现为先增加、后减小、再增加的复杂趋势。在固结围压 100 kPa 下,当细粒含量处于 0～40%的区间时,铁尾矿的抗液化能力随细粒含量的增加呈现出增加的趋势,该阶段不排水脆性指数从 0.87 缓慢降低至 0.83;随后,细粒含量继续增加,细粒含量处于 40%～60%时,铁尾矿的抗液化能力逐渐下降,该阶段不排水脆性指数从 0.83 增加至 0.88;最后,随着细粒含量的进一步增加,细粒含量超过 60%时,铁尾矿的抗液化能力会再一次上升,该阶段不排水脆性指数从 0.88 降低至 0.85。从不排水脆性指数变化角度来看,细粒含量介于 40%～60%的范围内,铁尾矿的液化敏感性较高。在整个变化过程中存在两个拐点,在固结围压为 100 kPa、200 kPa 时,分别为细粒含量 40%与 60%;在固结围压为 400 kPa 时,分别为细粒含量 20%与 60%;在固结围压为 600 kPa 时,分别为细粒含量 20%与 40%。可见,随着围压的增加,拐点对应的细粒含量相应减小,进而导致了不同围压下的不排水脆性指数随细粒含量变化曲线的不同。



(a) 不排水脆性指数与围压



(b) 不排水脆性指数与细粒含量

图 4 不排水脆性指数与围压、细粒含量关系曲线

Fig.4 Relationship curves of undrained brittleness index with confining pressure and fine grain content

从土体性质角度进行解释,以固结围压 100 kPa 为例,在细粒含量小于 40%时,尾矿为砂土,土的行为受砂粒结构的控制。细粒填充在砂粒间孔隙中,细粒含量增大使颗粒接触面也变大,导致不排水阻力增加,使得铁尾矿的抗液化能力增加,该阶段结论与 AMINI 等[14]、KWA 等[15]学者的试验结果一致。细粒含量在 40%～60%时,尾矿性质逐渐由砂

土向粉土转变,砂粒逐渐被细粒所包围,砂粒与砂粒之间的接触大大减少,细粒与细粒逐渐连通,形成润滑带,导致铁尾矿的抗液化能力下降;细粒含量达到60%以后,尾矿性质为粉土,剪切作用主要是对铁尾矿颗粒间的孔隙施加压力,此时,细粒占据主导地位,大量孔隙被填充,使其膨胀倾向增大,并抑制了偏应力的减小,导致抗液化能力上升。细粒含量在40%以后呈现的规律与陈振鹏[25]、胡再强等[26]的规律相似,但具体拐点并不相同。不同围压下,铁尾矿静态液化随细粒变化趋势一致,但两个拐点会产生变化,可解释为:增加围压会导致固结后的铁尾矿颗粒更紧密地排列,孔隙比下降,进而难以发生液化,从而导致其拐点对应的细粒含量减小。

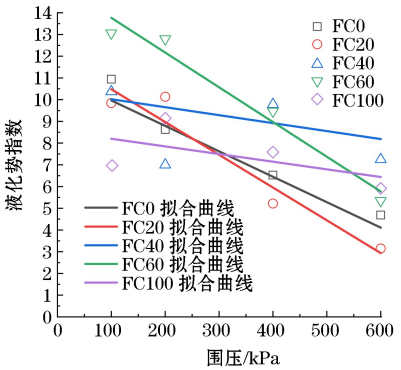
2.3 液化势指数

在剪切过程中,产生的超孔隙水压力会降低尾矿的平均有效应力,从而产生静力液化。为了定量描述剪切过程中孔隙水压力的变化,引入了液化势指数 L_P。液化势指数 L_P 能定量表征最小主应力的衰减程度,从而间接地反映在剪切阶段铁尾矿试样孔隙水压力的增加趋势,其定义为:

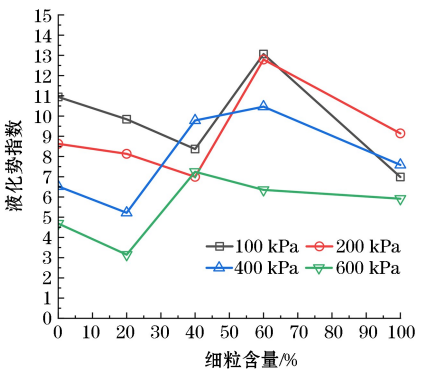
$$L_P=\frac{\sigma'_{3i}-\sigma'_{3cs}}{\sigma'_{3i}}$$

式中:σ'_{3i}为尾矿剪切开始时的最小主应力;σ'_{3cs}为达到临界状态时的最小主应力。

液化势指数越小,表明剪切阶段孔隙水压力变化越小,从而尾矿液化的可能性也越低。液化势指数随围压、细粒含量的变化如图5所示,5种不同细粒含量铁尾矿液化势指数取值范围为3.1~13.0。由图5(a)可知,铁尾矿试样的液化势指数随着固结围压的增大而逐渐降低。从孔隙水压力的变化来看,增加围压会导致固结后的铁尾矿颗粒更紧密地排列,孔隙比下降,孔隙水压力不易增高,导致铁尾矿难以发生静态液化。图5(b)表明,随着细粒含量的增加,液化势指数先下降,再上升,最后下降,变化趋势与不排水脆性指数得出的规律相似。从孔隙水压力角度可以解释为:当细粒含量小于20%时,较少的细粒会滑入砂粒之间的孔隙,将孔隙填充,导致孔隙水压力不易上升,尾矿不易液化。当细粒含量超过第一个阈值时,细粒虽会逐渐取代原有孔隙水位置,但其将砂粒隔开并形成较为封闭的孔隙,使其更易达到较高孔隙水压力,从而引发静态液化。当铁尾矿细粒含量超过第二个阈值时,砂粒之间的孔隙几乎被完全填满,导致固结后孔隙减少,使得在加载过程中孔隙水压力难以上升,进而有效地抑制尾矿的静态液化。



(a) 液化势指数与围压



(b) 液化势指数与细粒含量

图5 液化势指数与围压、细粒含量关系曲线

Fig.5 Relationship curves of liquefaction potential index with confining pressure and fine grain content

2.4 临界状态线

基于临界状态理论,进一步分析不同细粒含量铁尾矿的静态液化特性。临界状态线将铁尾矿在不同平均有效应力条件下的状态划分为两大区域:一为潜在流动液化区,该区域中的铁尾矿在特定条件下具有发生流动液化的可能性;二为无流动液化区,即此区域内的铁尾矿在相同条件下不会表现出流动液化的特性。临界状态线为对数坐标下平均有效应力 p' 与孔隙比 e 的关系曲线,铁尾矿在不同细粒含量下的临界状态线详见图6。曲线拟合依据TALBOT等[28]在临界状态土力学框架中的定义,拟合公式为:

$$e=\lambda-\kappa\ln p'$$

式中:λ 为 $p'=0$ 时对应于临界状态线上孔隙比的值;κ 为斜率。

由图6(a)可知,不同细粒含量铁尾矿均具有唯一的临界状态线,且在不同平均有效应力下几乎平

行。细粒含量 40%与 100%的临界状态线非常接近,表明两者在达到临界状态时的物理力学特性具有较高的相似性。随着细粒含量逐渐增加,临界状态线在 $e-\ln p'$平面内向下移动,直至铁尾矿细粒含量达到 60%。其后,随着细粒含量进一步增加,临界状态线开始向上移动。细粒含量 60%临界状态线位于所有曲线最下方,表明该细粒含量下铁尾矿最容易达到临界状态,因此细粒含量为 60%时最容易发生静态液化。图 6(b)以 FC60 为例,依据其临界状态线划分出无流动液化区与潜在流动液化区,表明细粒含量为 60%的铁尾矿在其孔隙比与平均有效应力确定的位置位于潜在流动液化区域时,则易发生静态液化。该结论对于指导攀枝花铁尾矿库工程实践具有一定参考意义。

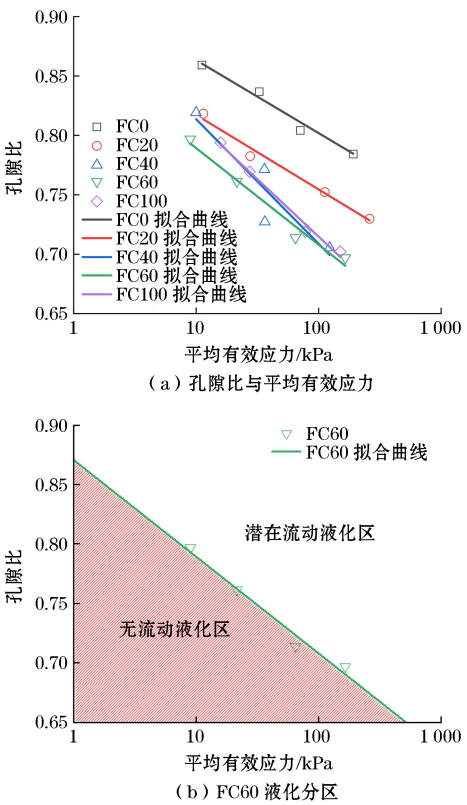


图 6 临界状态线

Fig.6 Critical state curve

3 结论

本文通过三轴不排水试验,探究了不同细粒含量铁尾矿的静态液化特性。基于应力-应变曲线、不排水脆性指数、液化势指数以及临界状态线,得出以下结论。

(1) 通过不排水脆性指数与液化势指数得出,铁尾矿抗液化能力随细粒含量增加表现为先增加,后减小,再增加的复杂趋势。在该变化过程中,铁尾矿土体性质也从砂土逐渐转变为粉土,其规律的变化即为其土体性质转变的外在表现。

(2) 不同细粒含量铁尾矿静态液化趋势变化过程中存在两个拐点阈值,其大小会受到围压的影响。围压越大,其阈值越小。针对攀枝花铁尾矿库,建议在堆积初期应尽量将细粒含量控制在 20%左右,因为随着铁尾矿的逐级堆载,其底层受到的压力会逐渐增大。而对于库区上部,由于所受压力相对较小,建议将细粒含量保持在 40%左右,从而预防静态液化的发生,确保尾矿库的整体稳定性。

(3) 不同细粒含量的铁尾矿的临界状态表现不同,攀枝花铁尾矿在细粒含量为 60%时最易液化。可见不同土体最易液化的细粒含量并不相同。因此,在预防尾矿坝溃坝时不能简单沿用已有研究结论,应对该库区土体进行测定,从而确保预防措施的针对性和有效性。

参考文献(References):

[1] 靳晓,王立娟,贾虎军,等.尾矿库安全稳定空间动态监测方法研究及应用[J].安全与环境学报,2018,18(3):882-888.
JIN Xiao, WANG Lijuan, JIA Hujun, et al. Theoretical and practical application of the spatial dynamic monitoring method for safety and stability of the tailing pond[J]. Journal of Safety and Environment,2018,18(3):882-888.

[2] 刘记.四川省主要矿山地质环境特征及其影响评价[D].成都:成都理工大学,2019.
LIU Ji. Characteristic and environmental impact assessment of mine geological environment in Sichuan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2019.

[3] 王昆,张峥,KAREN A H E,等.尾矿的特性、灾害及其资源潜力[J].金属矿山,2024(8):216-227.
WANG Kun, ZHANG Zheng, KAREN A H E, et al. Properties, disasters, and resource potential of mine waste tailings[J]. Metal Mine,2024(8):216-227.

[4] 袁华山,张明慧,陶霞,等.尾矿库环境事故因素分析及建议[J].环境工程技术学报,2024,14(3):1026-1033.
YUAN Huashan, ZHANG Minghui, TAO Xia, et al. Factors analysis and suggestions on environmental accident of tailings ponds[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2024,14(3):1026-1033.

[5] CAMBRIDGE M, SHAW D. Preliminary reflections on the failure of the Brumadinho tailings dam in January 2019[J]. Dams and Reservoirs,2019,29(3):113-123.

[6] CIONEK V M, ALVES G H Z, TÓFOLI R M, et al. Brazil in the mud again: lessons not learned from Mariana dam collapse[J]. Biodiversity and Conservation,2019,28(7):1935-1938.

[7] 闫蕊鑫.饱和黄土静态液化力学行为及启滑机制[D].西安:长安大学,2021.
YAN Ruixin. Static liquefaction mechanical behavior and induced-sliding mechanism of saturated loess[D]. Xi'an: Chang'an University,2021.

[8] 黄茂松,童森杰,时振昊,等.复杂应力路径下饱和砂土静态液化失稳预测[J].岩土工程学报,2021,43(1):19-26.
HUANG Maosong, TONG Senjie, SHI Zhenhao, et al. Prediction initiation of static liquefaction of saturated sand under complex stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(1):19-26.

[9] 万丽丽.饱和粉土静态液化特性研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.
WAN Lili. Study on static liquefaction characteristics of saturated silt[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China),2019.

[10] 张小玲,李秀瑜,杜修力.考虑细粒含量的砂土液化判别双曲线模型研究[J].岩土工程学报,2021,43(3):448-455.
ZHANG Xiaoling, LI Xiuyu, DU Xiuli. Hyperbolic model for estimating liquefaction potential of sand considering the influences of fine grains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(3):448-455.

[11] YEH S T. The effect of grain size distribution on the liquefaction potential of granular soils[D]. Boulder: University of Colorado at Boulder,1981.

[12] DEZFULIAN H. Effects of silt content on dynamic properties of sandy soils[C]// Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco:AIM Group,1984.

[13] KAUFMAN L P, CHANG N Y. Percentage silt content in sands and its effect on liquefaction potential[C]//Computational Methods and Experimental Measurements: Proceedings of the International Conference, Washington DC: Springer,1982:447-459.

[14] AMINI F, QI G Z. Liquefaction testing of stratified silty sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2000,126(3):208-217.

[15] KWA K A, AIREY D W. Effects of fines on liquefaction behaviour in well-graded materials[J]. Canadian Geotechnical Journal,2017,54(10):1460-1471.

[16] SHEN C K, VRYMOED J L, UYENO C K. The effects of fines on liquefaction of sands[C]// Proceedings of The 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo: Japanese Society of Soil Machinery & Foundation Engineers ,1977:381-385.

[17] VAID V P. Liquefaction of silty soils[C]// Ground Failures Under Seismic Conditions, New York: American Society of Civil Engineers,1994:1-16.

[18] YAMAMURO J A, LADE P V. Static liquefaction of very loose sands[J]. Canadian Geotechnical Journal,1997,34(6):905-917.

[19] BAYAT M, BAYAT E. Liquefaction potential of clean and silty sand[C]// 7th National Congress on Civil Engineering, Zahedan: University of Sistan and Baluchestan,2013.

[20] 巫尚蔚,杨春和,张超,等.粉粒含量对尾矿力学特性的影响[J].岩石力学与工程学报,2017,36(8):2007-2017.
WU Shangwei, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. The effects of silt content on the mechanical properties of tailings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(8):2007-2017.

[21] 吕玺琳,翁锰森,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(8):1128-1134.
LYU Xilin, WENG Mengsen, CAI Jiantao, et al. Study on the effect of fine particle content on static liquefaction instability of saturated silty sands by triaxial tests[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2021,49(8):1128-1134.

[22] LAW K T, LING Y H. Liquefaction of granular soils with noncohesive and cohensive fines[C]// Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco: AIM Group,1992:1491-1496.

[23] KOESTER J P. The influence of fines type and content on cyclic resistance[C]// Ground Failures Under Seismic Conditions, New York: American Society of Civil Engineers,1994:17-33.

[24] 张超,杨春和.尾矿坝液化判别简化方法研究[J].岩石力学与工程学报,2006(增刊2):3730-3736.
ZHANG Chao, YANG Chunhe. Study on a simplified procedure for evaluating liquefaction potential of tailings dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(Suppl.2):3730-3736.

[25] 陈振鹏.细粒含量对尾矿力学特性的影响研究[D].西安:西安理工大学,2021.
CHEN Zhenpeng. Effect of fine content on mechanical properties of tailings[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2021.

[26] 胡再强,陈振鹏,张光昕,等.细粒尾矿静态液化的室内试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(增刊1):3002-3009.
HU Zaiqiang, CHEN Zhenpeng, ZHANG Guangxin, et al. Laboratory experimental study on static liquefaction of fine tailings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(Suppl.1):3002-3009.

[27] LADE P V, DUNCAN J M. Cubical triaxial tests on cohesionless soil[J]. International Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1973,99(10):793-812.

[28] TALBOT A N, RICHART F E. The strength of concrete, its relation to the cement aggregates and water[R]. Urbana: University of Illinois,1923.