

基于耗散能量的饱和黄土动孔压模型

简 涛^{1,2}, 孔令伟^{1,2}, 柏 巍^{1,2}, 舒荣军^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 通过一系列不排水动三轴试验探究了饱和黄土振动液化过程中孔隙水压力和累积耗散能量的演化模式, 并讨论了围压、动应力幅值和固结应力比对其演化过程的影响。结果表明: 饱和黄土的孔隙水压力和耗散能量随着循环荷载作用逐渐累积。固结围压抑制孔隙水压力增长而消耗更多能量; 更大的动应力幅值使得孔隙水压力增长更快而消耗能量更少; 等压固结下, 孔隙水压力增长至围压从而触发初始液化, 而偏压固结下, 通常先达到振动液化应变标准而孔隙水压力并没有增长至围压水平, 并且固结应力比越大, 液化时孔隙水压力越小, 消耗能量也越少。归一化孔隙水压力 u/σ_0 与累积耗散能量 W/W_f 之间关系受围压、循环应力比和固结应力比影响较小, 可统一用双曲线模型表示。

关 键 词: 饱和黄土; 振动液化; 孔隙水压力; 累积耗散能量

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 08-2238-11

Dynamic pore pressure model for saturated loess based on dissipative energy

JIAN Tao^{1,2}, KONG Ling-wei^{1,2}, BAI Wei^{1,2}, SHU Rong-jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A series of undrained dynamic triaxial tests is carried out to investigate the evolution patterns of pore water and accumulative dissipated energy during the vibration-induced liquefaction of saturated loess, and the effects of confining pressure, dynamic stress amplitude and consolidation stress ratio on them are discussed. The results show that the pore water pressure and dissipated energy of saturated loess gradually build-up with the increase of cyclic loading times during vibration-induced liquefaction. The consolidation confining pressure inhibits the increase of pore water pressure and consumes more energy. Larger dynamic stress amplitude leads to faster increase in pore water pressure and less energy consumption. Under the isotropic consolidation, the increase of pore water pressure causes the effective stress to be 0, thus triggering the initial liquefaction. However, under anisotropic consolidation, the specimen usually reaches the strain criterion for liquefaction first, while the pore water pressure does not increase to the confining pressure level, and the larger consolidation stress ratio leads to the lower pore water pressure and less cumulative dissipated energy during liquefaction. The pore water pressure is closely related to the cumulative dissipated energy, and normalized pore water pressure u/σ_0 and the cumulative dissipated energy W/W_f are less influenced by the confining pressure, dynamic stress amplitude and consolidation stress ratio and can be expressed uniformly in a hyperbolic model.

Keywords: saturated loess; vibration-induced liquefaction; pore water pressure; cumulative dissipated energy

1 引 言

天然黄土结构疏松, 在饱和状态下具有很大的液化势和流动破坏势, 一定强度的地震活动便导致其液化破坏^[1-2]。黄土高原位于地震活动带, 曾发生多次强震并伴随大量地震诱发的黄土滑坡^[3-4]。1920

年宁夏海源 8.5 级地震在石碑塬地区引发大面积黄土液化^[5-6], 导致滑体运动了 1.5 km; 2013 年甘肃省岷漳地震诱发 2 000 多处滑坡, 其中有 600 多次发生在黄土层内, 仅永光村黄土泥流便造成了 14 栋房屋被毁, 12 人死亡的惨剧^[7-8]。研究表明^[5, 8-9], 饱和黄土的振动液化是地震诱发灾难性黄土泥流的

收稿日期: 2022-08-22

录用日期: 2022-11-24

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2018YFC1505304); 国家自然科学基金项目 (No. 41772339, No. 41877281)

This work was supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC1505304) and the National Natural Science Foundation of China (41772339, 41877281).

第一作者简介: 简涛, 男, 1993 年生, 博士研究生, 主要从事特殊土的力学特性研究。E-mail: focusjian@126.com

通讯作者: 孔令伟, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术方面的研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

主要原因。近些年，黄土地区的城镇逐渐向河谷高阶地和黄土塬上扩展，人类活动特别是农业灌溉导致黄土层内部含水率上升甚至形成局部饱和带，从而增加了黄土流滑这一严重震害的潜在风险。因此，饱和黄土振动液化潜力的评估十分必要，它能够为黄土地区震害预防提供理论和实践依据。

孔隙水压力累积是饱和土体振动液化的根本机制^[10-13]，分析孔隙水压力在循环荷载下的发展规律并建立预测模型是评价饱和土体振动液化潜力的重要工作之一。目前，基于循环荷载试验建立了的动孔压预测模型主要有应力模型、应变模型和能量模型^[12-13]。Seed^[14]采用反三角函数描述动孔压比与振次比之间的关系，最早建立了基于应力的动孔压模型。张建民等^[15]发现动孔压随循环周次的演化规律与土的密度和应力状态关系密切，将其分为 3 个类型（A、B、C 型）并建立了相应的表达式。然而，经典 Seed 模型的预测结果与试验结果有时存在较大偏差，在应用时常常需要加以修正^[2, 16]。基于应变的动孔压模型的建立是根据循环荷载下孔隙水压力与变形参数之间的关系，Martin-Finn-Seed 模型^[12]和汪闻韶模型^[17]均采用排水条件下的体变增量预测孔隙水压力，但是大量的模型参数需求限制了此类模型的应用^[13]。Nemat-Nasser 等^[18]认为循环荷载下孔隙水压力的累积与土体的耗散能量密切相关，Davis 和 Berrillzai 在此基础上提出了基于耗散能量预测孔隙水压力的方法^[19-20]。该方法从本质上考虑了循环荷载下孔隙水压力累积的机制，具有更加明确的物理意义，已经得到广泛应用^[11, 13, 21-22]。

目前，饱和黄土振动液化机制及孔隙水压力增长变化规律已得到广泛研究^[1-2, 10, 23-29]，并建立了动孔压预测模型。然而，这些模型大都是基于动孔压比与振次比之间的关系建立的^[1-2, 10, 23]，振次比作为模型自变量的缺点不可避免^[13, 21]，并且形式繁杂多样，给实际应用带来不便。因此，本文试图通过一系列饱和黄土不排水循环荷载三轴试验，分析讨论围压、动应力幅值和固结应力比对饱和黄土孔隙水压力与累积耗散能量变化的影响，并建立基于耗散能量的饱和黄土动孔压模型。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验黄土取自甘肃兰州某黄土边坡，取样深度 3~4 m，为马兰黄土（Q₃）。该黄土的基本物理指标如表 1 所示，天然含水率为 7.14%，干密度为 1.40 g/cm³，塑限含水率为 17.9%，液限含水率为

29.7%。颗粒组分以粉粒为主，占 80.78%，黏粒和砂粒含量较少，分别为 10.36%和 8.86%。

2.2 试验方法

循环三轴试验在 GCTS 公司生产的动静真三轴试验仪上进行，使用动三轴试验模块。试样尺寸高 100 mm，直径 50 mm。切削好的原状黄土试样经水头饱和后再进行反压饱和（压力为 200 kPa），使得试样饱和度达到 95%以上。随后饱和试样在等压或偏压条件下固结，固结完成后施加频率为 1 Hz 的正弦荷载进行循环三轴试验。等压固结条件下，围压分别为 50、100、200 kPa，循环应力比 CSR 分别为 0.10、0.15、0.20，其中 $CSR = \sigma_d / 2\sigma'_0$ ， σ_d 为动应力幅值， σ'_0 为初始平均有效应力。偏压固结条件下，围压为 100 kPa，固结应力比 $K_c = \sigma_1 / \sigma_3 = 1.5$ 时，CSR 分别为 0.13、0.15、0.17；CSR 为 0.13 时， K_c 分别为 1.10、1.20、1.35、1.70。在循环荷载试验中，通常将动孔压比 $r_u = u / \sigma'_0 = 1$ （孔压标准）或轴向应变达到 5%（应变标准）作为土体液化标准^[12]。由于偏压固结条件下试样孔隙水压力没有增长至围压水平，故本文在计算液化循环次数时，以先达到的标准作为液化判断准则。

表 1 兰州黄土基本物理指标

Table 1 Physical properties of Lanzhou loess

天然含水率 w	干密度 ρ_d	液限 w_L	塑限 w_p	颗粒组成 / %		
/ %	/(g · cm ⁻³)	/ %	/ %	黏粒	粉粒	砂粒
7.14	1.40	29.7	11.8	10.36	80.78	8.86

3 试验结果

3.1 饱和黄土不排水循环剪切特性

图 1 为典型的等压固结和偏压固结条件下饱和黄土的不排水循环剪切试验结果。循环荷载作用下，饱和黄土的孔隙水压力、轴向应变和偏应力都呈现出阶段性变化规律，与振动液化发展相关。循环荷载初期，偏应力呈稳定地周期性循环变化，轴向应变很小，孔隙水压力稳定循环增长，此阶段饱和黄土呈现出弹性体特征；循环荷载一定次数后（如图 1 所示，等压固结为第 15 次，偏压固结为第 52 次），孔隙水压力和轴向应变急剧增加，偏应力开始无法维持到设定标准以逐渐减小的幅值循环变化，此时饱和黄土结构被逐渐破坏，呈现塑性变化特征；在循环荷载的持续作用下，饱和黄土孔隙水压力增加至近围压水平，有效应力为 0，液化破坏开始，此后循环荷载小幅度变化便可引起孔隙水压力和轴向应变大幅度波动。固结条件对饱和黄土的循环剪切特性有很大影响，这是由于等压固结条件下循环荷

载不仅使得剪应力大小周期性变化并且方向也往复变化,而偏压固结条件下仅仅是剪应力大小变化,方向没有或变化很小^[12]。等压固结条件下,孔隙水压力能够增长至围压水平,在液化破坏后随循环荷载大幅度循环波动,试样拉伸变形破坏(见图 1(a)、

1(b));而在偏压固结条件下,荷载大小循环变化,但荷载方向不变,试样处于被压缩状态,轴向应变随循环振动逐渐累积,循环波动不明显(见图 1(e)),孔隙水压力随循环荷载逐渐增长最终稳定在接近围压水平(见图 1(d))。

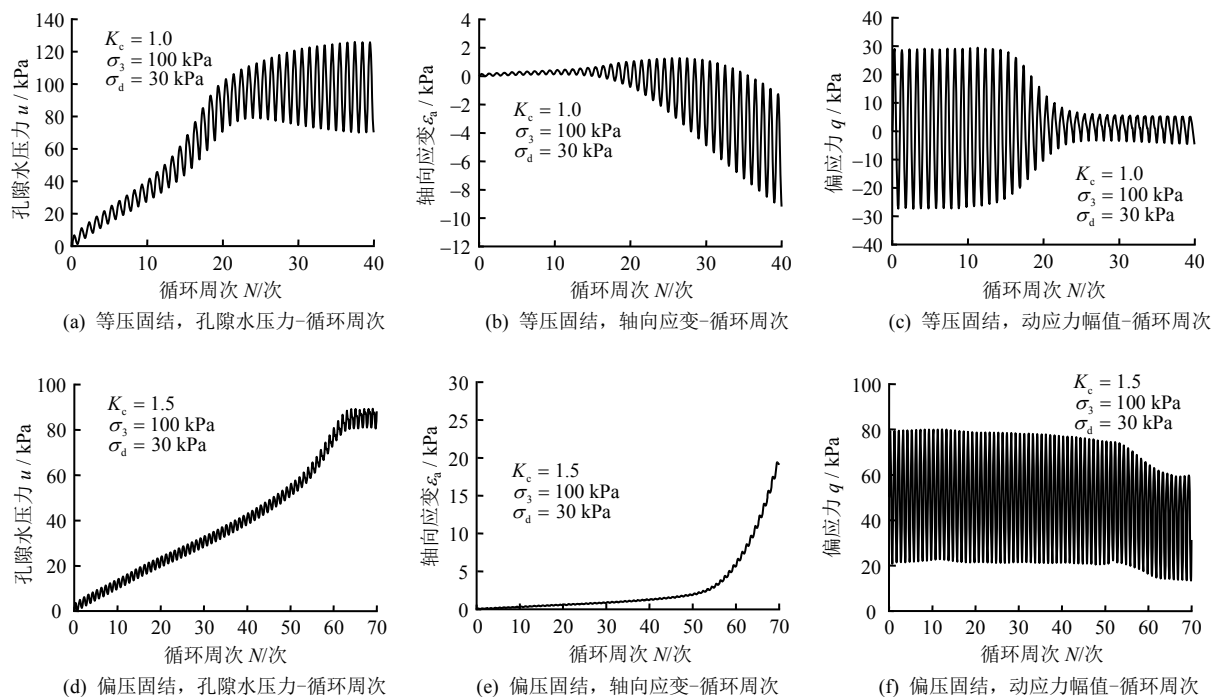


图 1 典型饱和黄土不排水循环三轴试验结果

Fig.1 Typical undrained cyclic triaxial test results of saturated loess

图 2 为循环荷载作用下饱和黄土的应力-应变曲线。每个循环周期下,应力-应变曲线呈现为滞回环。在循环荷载初期,饱和黄土处于可恢复的弹性变形阶段,轴向应变很小,滞回曲线沿垂直于应变轴方向上下波动且密集分布;到一定循环周期后,结构开始损伤破坏,每次循环荷载下产生不可恢复的塑性应变不断增大,滞回圈面积也会不断增大并且滞回圈中心向应变累积方向移动。等压固结条件下,轴向应变在轻微压缩后主要为拉伸变形,滞回圈长轴逐渐由应力方向转变为应变方向,并逐渐向应变轴靠近;而偏压固结条件下因只存在压缩变形,滞回圈中心向应变累积方向水平移动,在土体结构损伤破坏后,每个动荷载周期内塑性变形急剧增加,致使滞回圈逐渐不完全闭合。在 p' - q 空间中,随着循环荷载的进行,应力路径不断向低有效应力 p' 处靠近,如图 3 所示。等压固结条件下,加载初期应力路径快速向低有效应力处循环迁移,直至达到 $p'=0$,试样液化破坏。偏压固结条件下,应力路径循环向低平均有效应力方向迁移,但并没有达到 $p'=0$ 状态,轴向应变逐渐累积到一定程度后急剧

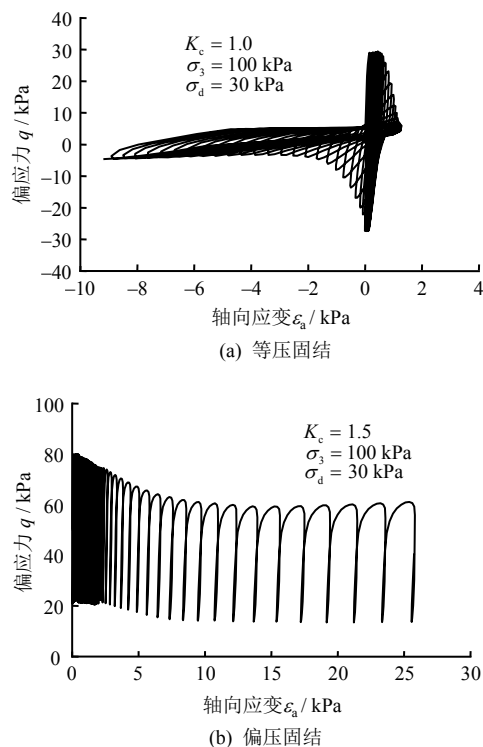


图 2 典型饱和黄土不排水循环三轴试验应力-应变曲线
Fig.2 Typical stress-strain curves of undrained cyclic triaxial test on saturated loess

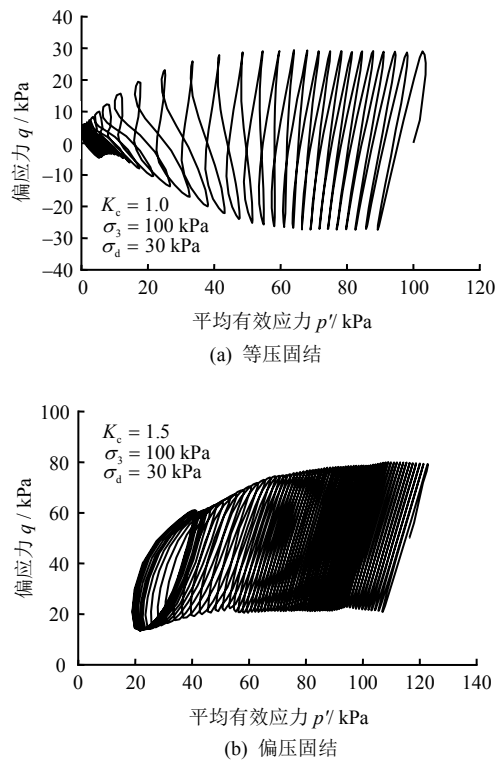


图 3 典型饱和黄土不排水循环三轴试验有效应力路径
Fig.3 Typical effective stress paths of undrained cyclic triaxial test on saturated loess

增加导致试样遭受不可承受的压缩变形而破坏。

3.2 循环荷载作用下饱和黄土动孔压演化特征

循环荷载作用下，孔隙水压力的累积是导致土体振动液化的直接原因，孔隙水压力常常作为评估土体液化潜力的指标^[11-12]。饱和黄土的振动液化也与孔隙水压力上升密切相关，因此接下来便分析循环荷载作用下饱和黄土的孔隙水压力的演化规律。

在循环荷载作用下，孔隙水压力表现出随动应力变化的循环效应和累积效应，用每个循环周期内孔隙水压力最大值 $u_{\max}$ 与最小值 $u_{\min}$ 的平均值表示该循环周期的孔隙水压力 u ，如图 4 所示，即第 i 循环周期的孔隙水压力 $u_i = (u_{\max,i} + u_{\min,i}) / 2$ 。

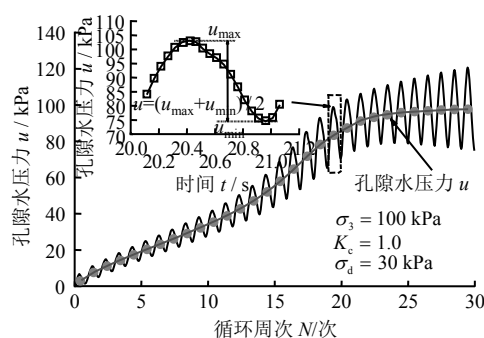


图 4 孔隙水压力确定示意图
Fig.4 Schematic diagram of pore water pressure determination

图 5 为不同应力条件下，循环荷载下饱和黄土孔隙水压力随循环振次演化曲线。等压固结条件下，孔隙水压力最终都能增长至围压水平（见图 5(a)、5(b)、5(c)）；同一围压下随着动应力幅值增大，饱

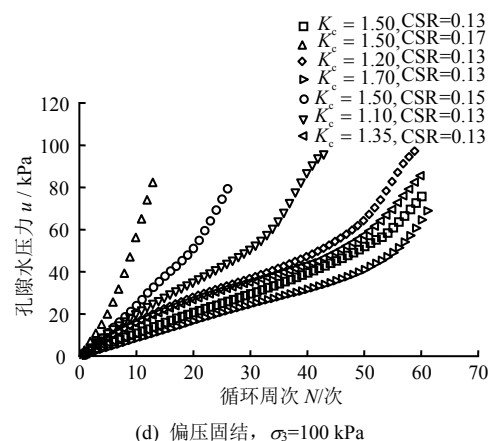
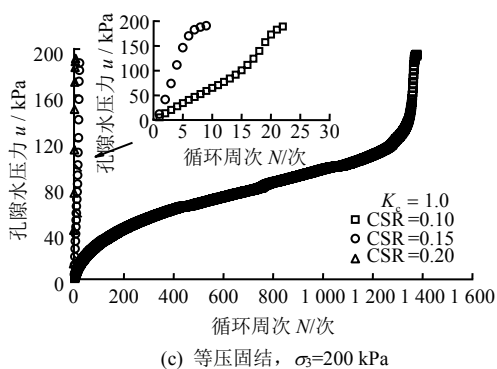
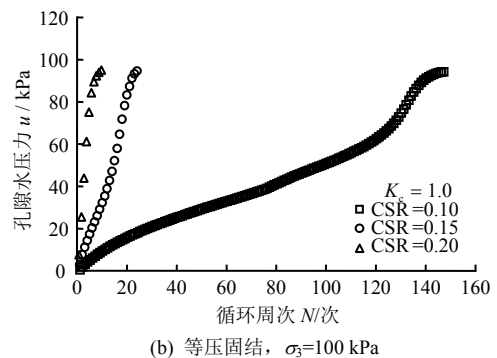
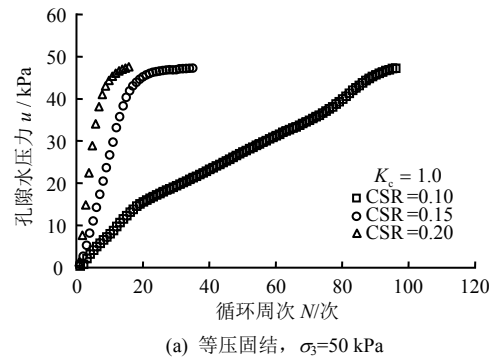


图 5 孔隙水压力与循环周次的关系曲线
Fig.5 Relationship between pore water pressure and number of cycles

和黄土振动液化的循环周次更少,即试样孔隙水压力增长更为迅速,更快达到初始液化;而当循环应力比相同时,随着围压增大,饱和黄土振动循环液化次数增多,孔隙水压力发展更平缓,并且循环应力比越小,围压对饱和黄土振动液化影响越大。在偏压固结条件下,尽管试样的轴向应变最终急剧增长,但孔隙水压力最终离围压水平还有一定差距(见图 1(d)、1(e)),通常先达到振动液化的应变标准。从图 5(d)可以看出,在偏压固结条件下,更大的动应力幅值更有利于饱和黄土振动液化,这与等压固结条件下是相同的;但围压相同时,偏压固结条件下饱和黄土振动液化的循环次数增加,也即偏压固结条件下饱和黄土抗液化能力更大,并且随着固结应力比增大,振动液化的循环次数增多。初始静偏应力比增大,循环应力比越大,液化时孔压越高;而当循环应力比相同时,固结应力比越大,达到液化时孔压更小。尽管静偏应力在试样内部产生了初始剪应力,但土体的抗液化能力却增大,这是由于等压固结条件下,循环荷载使剪应力不仅发生大小变化,还使得剪应力方向往复变化,而偏压固结条件下,剪应力可能只存在大小变化,而方向上的变化很小或不存在^[12]。也就是说,在偏压固结条件下循环荷载使试样主要产生压缩变形,而等压固结条件下循环荷载使试样拉伸变形。

饱和土体振动液化过程中孔隙水压力的增长大致可以分为 3、4 个阶段^[11, 30]。根据上述饱和黄土的孔隙水压力随循环振次的增长规律,可将循环荷载下饱和黄土的孔隙水压力演化总结为 4 个阶段,如图 6 所示。

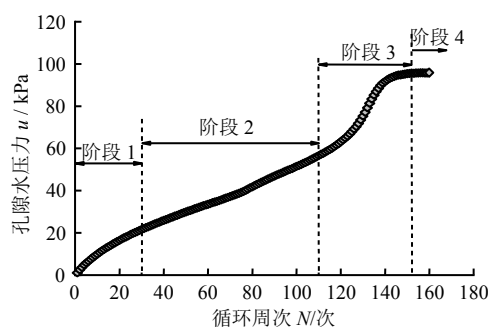


图 6 饱和黄土孔隙水压力随循环周次变化的典型模式
Fig.6 Typical pattern of pore water pressure with number of cycles for saturated loess

(1) 阶段 1, 初始增长阶段。在循环荷载作用下,孔隙水压力急剧增长,曲线呈上凸形。从轴向应变曲线(见图 1(b)、1(e))可以看出,在加载初期试样有被压缩的趋势,结构疏松的饱和黄土被振

动压密,使得孔隙空间变小,导致孔隙水压力急剧上升。

(2) 阶段 2, 稳定发展阶段。经过第 1 阶段的急剧上升,孔隙水压力增长速率逐渐变缓,然后以一个几乎恒定的速率增长,在该阶段饱和黄土呈现弹性变形特征,孔隙水压力随振动荷载稳定地循环增长。

(3) 阶段 3, 急剧增长阶段。累积的孔隙水压力使得试样中有效应力不断减小,到一定程度后,饱和黄土结构坍塌破坏,导致孔隙水承担更多的荷载,故孔隙水压力急剧上升,直到增长至围压水平,试样达到初始液化破坏。

(4) 阶段 4, 液化后稳定阶段。此时饱和黄土已完全液化破坏,极小的轴向荷载变化便引发孔隙水压力大幅度波动,孔隙水压力稳定在略小或等于围压水平。

循环荷载作用下,典型的饱和黄土孔隙水压力增长曲线呈现 S 形变化模式。但土体振动液化过程中孔隙水压力的变化模式受土的物理性质和应力条件影响^[12, 15]。张建民等^[15]总结了砂土的孔隙水压力发展模式,将其分为 A、B、C 3 种类型,并发现随着固结围压的减小或动应力水平的增大,孔隙水压力的增长模式逐渐由 C 型(S 形曲线)过渡到 A 型(双曲线)。饱和黄土的孔隙水压力随循环周次的变化模式同样受固结围压和动应力幅值的影响,围压减小或动应力幅值增大,孔隙水压力增长曲线也逐渐由 S 形曲线向双曲线转变。

3.3 传统动孔压模型拟合结果

常用的动孔压预测模型是根据孔压比 $r_u = u / \sigma'_0$ 与振次比 N / N_f 之间的关系,如经典的 Seed 模型^[12]和杨振茂等^[2]建议的饱和原状黄土的三角函数模型:

$$\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{2\theta}} \quad (1)$$

$$\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \cos \pi \frac{N}{N_f} \right) \right]^a - \frac{1}{2} e^{-b \frac{N}{N_f}} + \frac{1}{2} \quad (2)$$

式中: σ'_0 为初始平均有效应力; N_f 为振动液化时的循环振次; θ 、 a 、 b 为拟合参数。

采用两种模型对饱和黄土不排水循环荷载试验结果进行拟合,结果如图 7 所示。从图中可以看出,两种模型分别对特定的变化模式拟合结果较好,Seed 模型对 S 形变化曲线拟合效果较好,如图 7(a)所示,随着动应力幅值的增大,孔隙水压力增长模式逐渐向双曲线形式转变,其拟合效果逐渐变差。尽管三

角函数模型是根据饱和原状黄土试验结果建立的，但其实际拟合效果也并不能完全令人满意。造成这种误差的原因是采用 N_f 归一化循环周次 N 后的孔隙水压力发展模式存在多种路径， u/σ'_0 与 N/N_f 之间的关系难以用统一的函数模型来拟合，而采用多个函数分别描述不同的孔隙水压力增长模式又过于繁琐^[15]。另外，两种动孔压模型对偏压固结下的孔隙水压力增长拟合效果都不理想（见图 7(d)），Seed

模型是基于等压固结条件下饱和砂土不排水循环剪切试验结果建立的，没有考虑初始静偏应力对孔隙水压力发展的影响。与等压固结条件相比（见图 7(b)、7(d)），偏压固结时，循环荷载作用下饱和黄土孔隙水压力增长较为缓慢，且并没有增长至引起初始液化的水平。从表 2 可以看出，一些应力条件下拟合结果的 R^2 值较小，采用这些模型估算的孔隙水压力与实测值存在不可接受的误差。

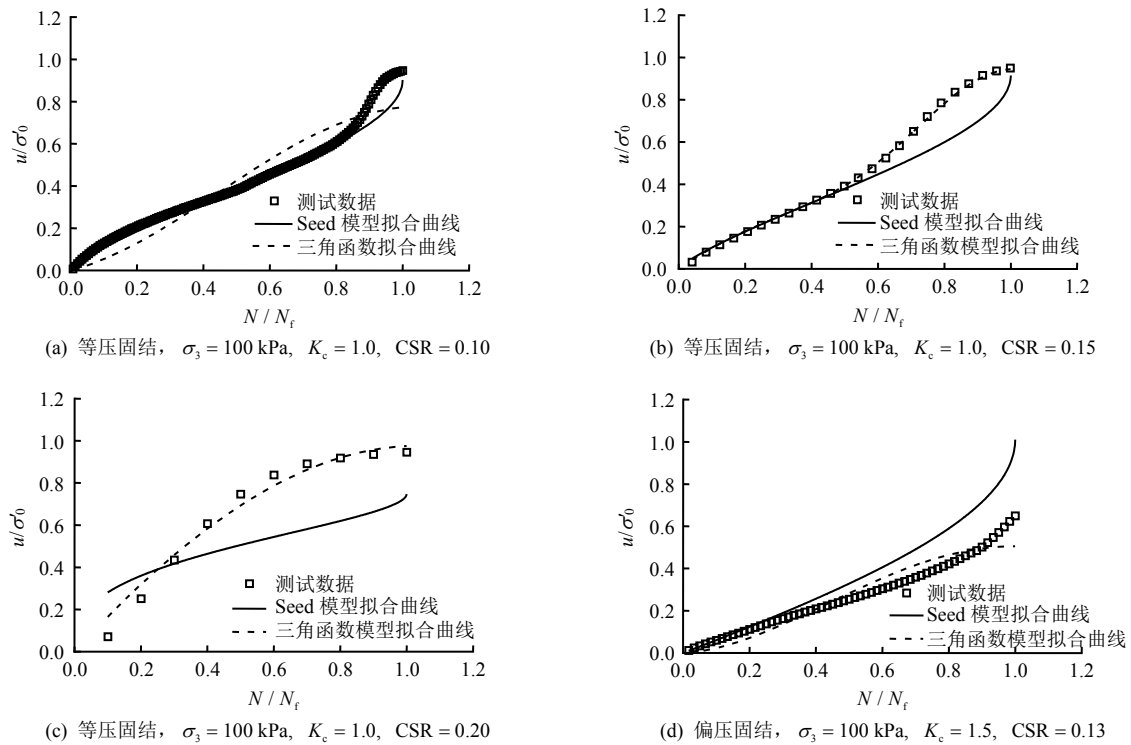


图 7 传统动孔压模型的拟合曲线

Fig.7 Fitting curves for the conventional dynamic pore pressure models

表 2 传统动孔压模型拟合结果

Table 2 Fitting results for the conventional dynamic pore pressure model

应力条件			Seed 模型		三角函数模型		
σ_3 / kPa	K_c	CSR	θ	R^2	a	b	R^2
100	1.0	0.10	1.297	0.959 5	0.933	0.790	0.897 8
100	1.0	0.15	1.249	0.879 4	3.058	2.198	0.999 4
100	1.0	0.20	2.810	0.400 2	0.712	2.982	0.972 2
100	1.5	0.13	0.977	0.445 3	0.838	0.011	0.921 7

4 基于累积耗散能量的饱和黄土动孔压模型

经过上文分析可知，根据 u/σ'_0 与 N/N_f 之间关系而建立的动孔压模型在拟合饱和黄土动孔压增长时表现较差，这是将 N/N_f 作为变量的孔压模型的固有缺陷^[13, 21]。因此需要采用一个新的指标作为自变量建立一个简单的、适用性强的饱和黄土动孔压

模型。不排水条件下，循环荷载在单位体积土体的累积耗散能量与孔隙水压力的产生密切相关^[13, 18, 22]。累积耗散能量不仅包含了振动荷载的循环周次信息，还在一定程度上反映了孔隙水压力的增长机制^[21]。每个循环周期内单位体积土体耗散能量即为滞回曲线面积，它同时依赖于动应力和动应变。动应力作用使得土颗粒相对运动造成能量消耗，而颗粒重新排列则导致了孔隙水压力的增长，采用循环荷载作用下单位土体累积耗散能量预测孔隙水压力变化更加科学合理^[21-22]。采用该方法时，计算滞回圈面积便成为首先要解决的问题。由于每个循环周期下土体均存在塑性应变，故滞回圈并不是标准椭圆，使用椭圆曲线拟合动应力-动应变曲线存在较大误差，并且计算繁琐，工作量大。通常在进行动三轴试验时，每个循环周期都会采集多个数据点，本次试验每个循环周期采集 20 个数据点，这些数据点在动应力-

动应变平面上的连线即描绘了滞回曲线的大致形状,饱和黄土的典型滞回曲线如图 8 所示。本文采用陈伟等^[31]提出的动应力-动应变滞回曲线面积的近似计算方法,将数据点顺序连接而成的多边形的面积即为滞回圈面积,也即为单位体积土体在该循环周期内所耗散的能量。该方法在计算滞回圈面积时,计算简便且不受滞回曲线形状和位置的影响。

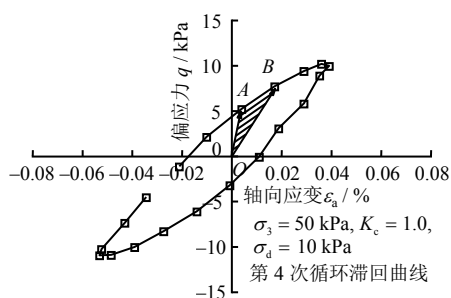


图 8 典型饱和黄土滞回曲线

Fig.8 Typical hysteresis loop for saturated loess

图 8 中三角形 OAB 的面积为向量 OA 与 OB 叉乘所得向量的模的 $1/2$, 即

$$S_{OAB} = \frac{1}{2} |OA \times OB| = -\frac{1}{2} \begin{vmatrix} \varepsilon_{a,A} & \sigma_{d,A} \\ \varepsilon_{a,B} & \sigma_{d,B} \end{vmatrix} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_{a,A}$ 、 $\sigma_{d,A}$ 、 $\varepsilon_{a,B}$ 、 $\sigma_{d,B}$ 分别为 A 、 B 点的动应变和动应力。

而第 i 次循环滞回曲线的面积为

$$S_i = -\frac{1}{2} \left\{ \begin{vmatrix} \varepsilon_{a,1} & \sigma_{d,1} \\ \varepsilon_{a,2} & \sigma_{d,2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \varepsilon_{a,2} & \sigma_{d,2} \\ \varepsilon_{a,3} & \sigma_{d,3} \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} \varepsilon_{a,j} & \sigma_{d,j} \\ \varepsilon_{a,j+1} & \sigma_{d,j+1} \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} \varepsilon_{a,19} & \sigma_{d,19} \\ \varepsilon_{a,20} & \sigma_{d,20} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \varepsilon_{a,20} & \sigma_{d,20} \\ \varepsilon_{a,1} & \sigma_{d,1} \end{vmatrix} \right\} \quad (4)$$

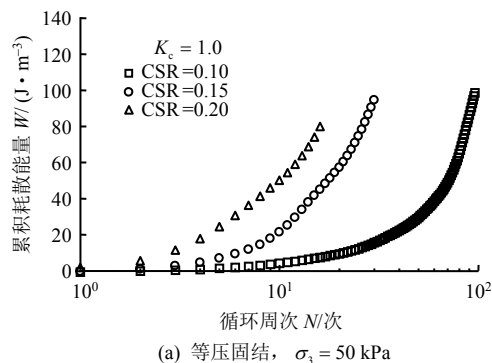
式中: $\varepsilon_{a,j}$ 、 $\sigma_{d,j}$ 分别为第 j 个数据点的动应变和动应力。

第 i 次循环的累积耗散能量 W_i 为第 1 次循环至第 i 次循环滞回圈面积之和, 即 $W_i = \sum_{i=1}^i S_i$ 。

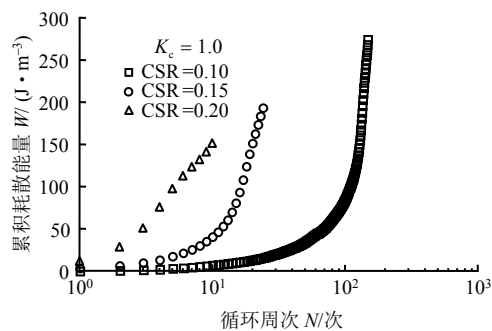
4.1 循环荷载作用下累积耗散能量的变化特征

图 9 为不同应力条件下饱和黄土振动液化过程中累积耗散能量随循环周次的变化曲线。随着循环周次的增加, 累积耗散能量单调增加, 直至试样液化破坏。在加载初期, 累积耗散能量增长较慢, 到一定循环次数后急剧增加, 与孔隙水压力的急剧增长相一致 (见图 5)。这是由于在加载初期, 饱和黄土呈弹性变形的特征, 循环荷载下颗粒间相对运动

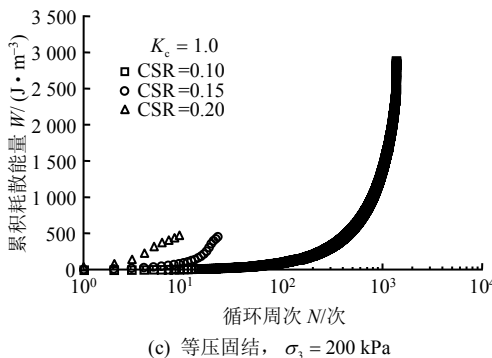
较小, 故消耗能量较少并且孔隙水压力也缓慢增长; 而当饱和黄土结构开始破坏后, 循环荷载导致土体相当大的塑性变形, 消耗能量急剧增加, 孔隙水压力也由于结构坍塌而急剧增长。等压固结下, 更小的动应力幅值达到振动液化的循环周次更多, 累积



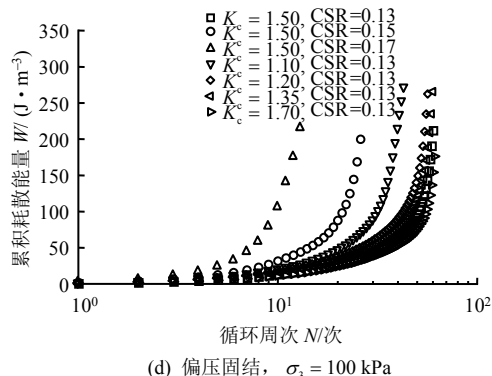
(a) 等压固结, $\sigma_3 = 50$ kPa



(b) 等压固结, $\sigma_3 = 100$ kPa



(c) 等压固结, $\sigma_3 = 200$ kPa



(d) 偏压固结, $\sigma_3 = 100$ kPa

图 9 累积耗散能量随循环周次变化曲线

Fig.9 Accumulative dissipated energy per unit volume vs. the number of cycles

耗散能量也更大,不同围压下动应力幅值的影响是一致的;而在相同的循环应力比下,围压增大导致饱和黄土振动液化需要消耗更多的能量。当存在初始静偏应力时,尽管在更大循环应力比下饱和黄土更快达到振动液化,但最终累积耗散能量几乎相同,而增长速率随着动应力幅值增大而增大。而当动应力幅值相近时,固结应力比越大,累积耗散能量越小,这可能是更大的初始静偏应力对饱和黄土试样结构产生了更大程度的破坏,而使得达到振动液化所消耗的能量更小。

4.2 孔隙水压力与累积耗散能量之间的关系

图 10 绘制了动孔压比随累积耗散能量增长的变化曲线,分别显示了动应力幅值、围压和固结应力比对他们之间关系的影响。总的来说,随着累积

耗散能量的增加孔隙水压力逐渐增大。从图 10(a)可以看出,在孔隙水压力增长初期,不同动应力幅值下孔隙水压力增长消耗能量相近,但在更大的动应力幅值作用下,孔隙水压力在更小的能量消耗下急剧增长并且达到液化时消耗能量更少,循环应力比对孔隙水压力与累积消耗能量之间关系的影响与固结方式无关,只是等压固结下影响更为显著。图 10(b)显示了围压对孔隙水压力与累积耗散能量之间关系的影响,围压越大,饱和黄土振动液化消耗的能量越多,这也就意味着在更小的围压下,孔隙水压力随能量消耗增长更快。而当固结应力比增大时,随着累积耗散能量增加孔隙水压力增长越慢,如图 10(c)所示。

4.3 基于耗散能量的动孔压模型

分别采用固结后的平均有效应力 σ'_0 和液化时累积耗散能量 W_f 对孔隙水压力 u 和累积耗散能量 W 进行归一化处理,从图 11 可以看出,归一化效果很好。归一化孔压 u/σ'_0 与累积耗散能量 W/W_f 之间的关系明显符合双曲线函数,即

$$\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{W/W_f}{m + n(W/W_f)} \quad (5)$$

式中: m 、 n 为拟合参数。采用式 (5) 对不同应力条件下的 u/σ'_0 - W/W_f 关系进行拟合,结果如表 3 所示,除工况 $\sigma_3 = 200$ kPa、 $K_c = 1.0$ 、 $CSR = 0.1$ 试验结果拟合效果稍差外,其他工况的试验拟合结果相关性都很高 ($R^2 =$ 均大于 0.98)。由式 (5) 曲线特征可知,参数 n 、 m 都越大时, u/σ'_0 随 W/W_f 增长越缓慢且终值越小。在等压固结条件下,归一化数据在一条窄带内分布,由于围压和动应力幅值对孔隙水压力增长的影响效应是相反的,难以建立 CSR 和围压与拟合参数 m 和 n 之间的函数关系,从而得到具体的预测方程,但笔者建议一个均值函数, $\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{W/W_f}{0.343 + 0.7(W/W_f)}$, 它是对所有等压固结条件下试验数据的拟合结果,相关性较高, $R^2 = 0.9551$ 。偏压固结条件下,拟合参数 m 和 n 都随着固结应力比 K_c 的增大而增大,其中 $m = 0.95 - 4.46(0.08)^{K_c}$, $n = 0.34 + 0.03(K_c)^{5.66}$, 将其代入式 (5) 便可得到偏压固结条件下的孔隙水压力预测方程。

5 结 论

本文通过一系列循环三轴试验,分析了饱和黄土不排水循环剪切特性,并讨论了围压、动应力幅值和固结应力比对饱和黄土孔隙水压力和累积耗散能量演化的影响,建立了基于累积耗散能量的饱和

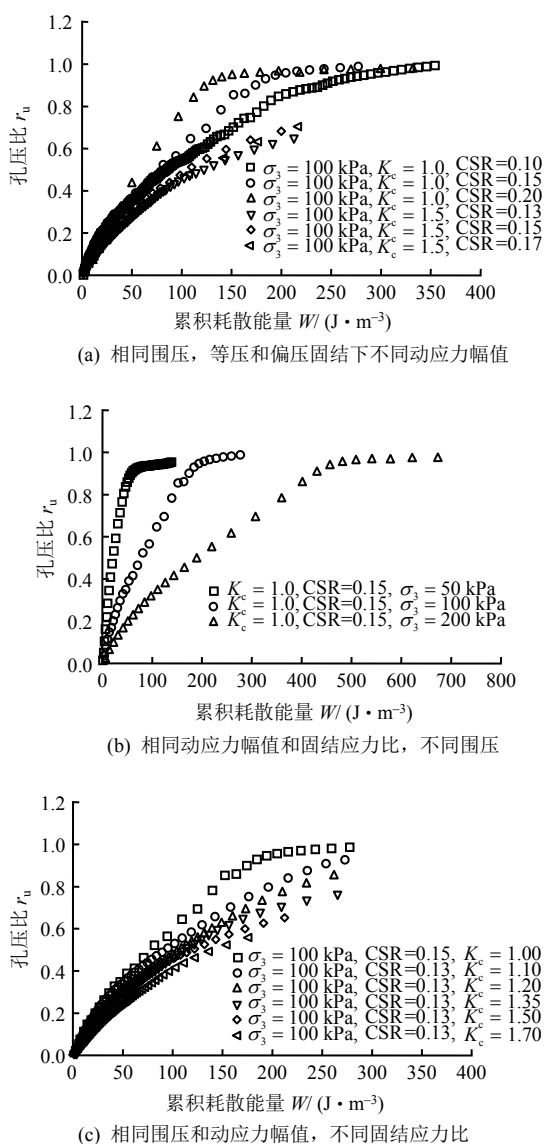


图 10 应力条件对孔隙水压力与累积耗散能量关系的影响
Fig.10 Effect of stress conditions on the relationship between pore water pressure and cumulative dissipated energy

表 3 基于耗散能量的动孔压模型拟合结果
Table 3 Fitting results of dynamic pore pressure model
based on dissipated energy

应力条件			拟合结果		
σ_3 / kPa	K_c	CSR	m	n	R^2
50	1.00	0.10	0.297	0.784	0.991 6
50	1.00	0.15	0.183	0.801	0.981 8
50	1.00	0.20	0.315	0.676	0.985 0
100	1.00	0.10	0.370	0.708	0.989 7
100	1.00	0.15	0.561	0.493	0.995 0
100	1.00	0.20	0.625	0.384	0.992 8
200	1.00	0.10	0.314	1.344	0.919 4
200	1.00	0.15	0.596	0.496	0.995 2
200	1.00	0.20	0.668	0.342	0.996 1
100	1.10	0.13	0.404	0.696	0.993 6
100	1.20	0.13	0.398	0.706	0.994 1
100	1.35	0.13	0.467	0.846	0.994 3
100	1.50	0.13	0.624	0.893	0.999 5
100	1.50	0.15	0.621	0.829	0.999 1
100	1.50	0.17	0.613	0.825	0.999 3
100	1.70	0.13	0.891	0.892	0.999 6

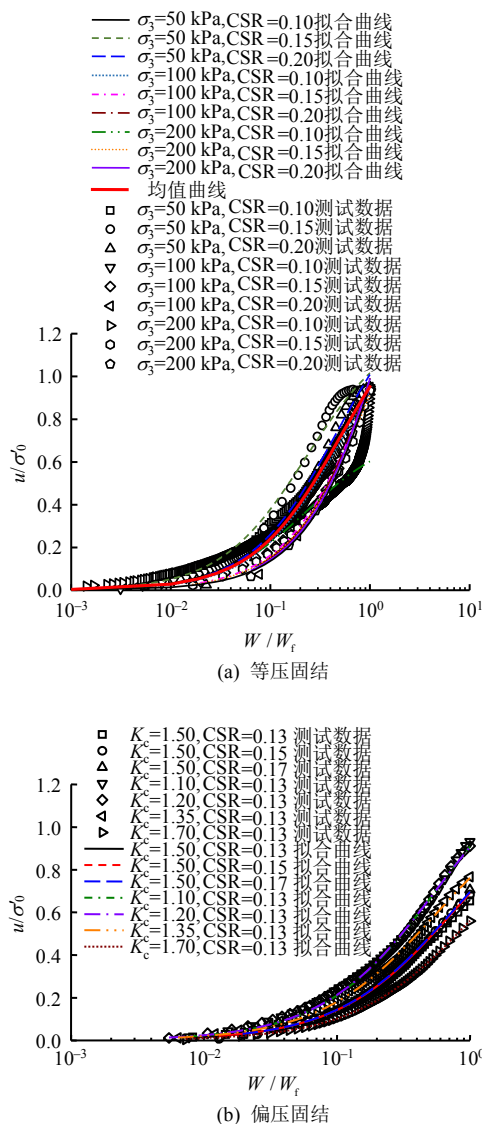


图 11 基于耗散能量的孔隙水压力模型拟合曲线

Fig.11 Fitting curves of a pore water pressure model based on cumulative dissipated energy

黄土动孔压预测模型，主要结论如下：

(1) 饱和黄土的孔隙水压力和轴向应变都随着循环荷载次数的增加而增加，应力-应变曲线呈现循环迁移特征，应力路径向低有效应力处移动。等压固结条件下，孔隙水压力逐渐增长至与围压相等，导致有效应力为 0，触发初始液化；偏压固结条件下，通常先达到振动液化的应变标准，此时孔隙水压力并没有增长至围压水平。

(2) 同一围压下，随着循环应力的增大，振动液化循环次数降低，而对于给定的循环应力比，随着围压的增加则需要更多次荷载循环土体才能达到振动液化。偏压固结能降低饱和黄土液化潜力，随着固结应力比的增大，振动液化循环次数增多。典型的饱和黄土动孔压随循环周次增长呈 S 形增长变化，随着循环应力比的增大或固结围压的减小，动孔压增长逐渐由 S 形曲线向双曲线过渡。将振次比 N/N_f 作为自变量的动孔压模型预测饱和黄土孔隙水压力没有取得令人满意的结果。

(3) 循环荷载作用下，土体的耗散能量随着循环次数增加而增长，固结围压越大，土体液化时消耗能量越多，而在更大的循环应力比下，土体液化加快，相应的消耗能量更少，尽管更大的固结应力比下，振动液化的循环荷载次数更多，但消耗能量却相对较少。饱和黄土振动液化过程中累积消耗能量变化与孔隙水压力发展一致，归一化孔压比 u/σ'_0 与累积耗散能量 W/W_f 之间关系受围压、循环应力比和固结应力比影响较小，可统一用双曲线模型表示。

参考文献

- [1] 王兰民, 刘红玫, 李兰, 等. 饱和黄土液化机制与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 92-97.
WANG Lan-min, LIU Hong-mei, LI Lan, et al. Laboratory study on the mechanism and behaviors of saturated loess liquefaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 92-97.
- [2] 杨振茂, 赵成刚, 王兰民. 饱和黄土液化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 864-871.
YANG Zhen-mao, ZHAO Cheng-gang, WANG Lan-min. Testing study on saturated loess liquefaction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(5): 864-871.
- [3] WANG Lan-min, WU Zhi-jian, XIA Kun. Effects of site conditions on earthquake ground motion and their

- applications in seismic design in loess region[J]. **Journal of Mountain Science**, 2017, 14(6): 1185-1193.
- [4] DERBYSHIRE E. Geological hazards in loess terrain, with particular reference to the loess regions of China[J]. **Earth Science Reviews**, 2001, 54(1): 231-260.
- [5] 邓龙胜, 范文. 宁夏海原 8.5 级地震诱发黄土滑坡的变形破坏特征及发育机制[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 30-37.
- DENG Long-sheng, FAN Wen. Deformation breakage characteristics and development mechanism of loess landslide triggered by Haiyuan M8.5 earthquake in Ningxia[J]. **Journal of Catastrophology**, 2013, 28(3): 30-37.
- [6] 张晓超, 黄润秋, 许模, 等. 石碑塬滑坡黄土液化特征及其影响因素研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 801-810.
- ZHANG Xiao-chao, HUANG Run-qiu, XU Mo, et al. Loess liquefaction characteristics and its influential factors of Shibei yuan landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 801-810.
- [7] 许冲, 徐锡伟, 郑文俊, 等. 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震触发滑坡及其构造分析[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 616-626.
- XU Chong, XU Xi-wei, ZHENG Wen-jun, et al. Landslides triggered by the 2013 Minxian-Zhangxian, Gansu province M_s 6.6 earthquake and its tectonic analyses[J]. **Seismology and Geology**, 2013, 35(3): 616-626.
- [8] 王兰民, 蒲小武, 吴志坚, 等. 地震和降雨耦合作用下黄土边坡动力响应的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1287-1293.
- WANG Lan-min, PU Xiao-wu, WU Zhi-jian, et al. Shaking table tests on dynamic response of loess slopes under coupling effects of earthquakes and rainfalls[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(7): 1287-1293.
- [9] SEED H B. Landslides during earthquakes due to soil liquefaction[J]. **Journal Soil Mechanics Foundations Division, ASCE**, 1966, 94(5): 1055-1122.
- [10] 余跃心, 刘汉龙, 高玉峰. 饱和黄土孔压增长模式与液化机制试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 395-399.
- SHE Yue-xin, LIU Han-long, GAO Yu-feng. Study on liquefaction mechanism and pore-water pressure mode of saturated original loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 395-399.
- [11] KONSTADINOU M, GEORGIANNOU V N. Prediction of pore water pressure generation leading to liquefaction under torsional cyclic loading[J]. **Soils and Foundations**, 2014, 54(5): 993-1005.
- [12] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 153-173.
- XIE Ding-yi. Soil dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 153-173.
- [13] CETIN K O, BILGE H T. Cyclic large strain and induced pore pressure models for saturated clean sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(3): 309-323.
- [14] SEED H B. A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, 1971, 97(9): 1249-1274.
- [15] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力增长的实用算法[J]. 水利学报, 1991, 22(8): 45-51.
- ZHANG Jian-min, XIE Ding-yi. A pragmatic method for calculating the excess pore water pressure generation of saturated sand under cyclic loading[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1991, 22(8): 45-51.
- [16] 刘汉龙, 张宇, 郭伟, 等. 微生物加固钙质砂动孔压模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 790-801.
- LIU Han-long, ZHANG Yu, GUO Wei, et al. A prediction model of dynamic pore water pressure for MICP-treated calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(4): 790-801.
- [17] 汪闻韶. 饱和砂土振动孔隙水压力试验研究[J]. 水利学报, 1962, 3(2): 37-47.
- WANG Wen-shao. Study on pore water pressures of saturated sands due to vibration[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1962, 3(2): 37-47.
- [18] NEMAT-NASSER S, SHOKOOH A. A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1979, 16(4): 659-678.
- [19] DAVIS R O, BERRILL J B. Energy dissipation and seismic liquefaction in sands[J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1982, 10(1): 59-68.
- [20] BERRILL J B, DAVIS R O. Energy dissipation and seismic liquefaction of sands: revised model[J]. **Soils and Foundations**, 1985, 25(2): 106-118.

- [21] 刘叔灼, 李慧子, 单毅, 等. 基于能量法的尾矿土动孔压模型研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2051-2058.
LIU Shu-zhuo, LI Hui-zi, SHAN Yi, et al. Energy method for analyzing dynamic pore water pressure model for tailing soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(11): 2051-2058.
- [22] AZEITEIRO R J N, COELHO P A L F, TABORDA D M G, et al. Energy-based evaluation of liquefaction potential under non-uniform cyclic loading[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2017, 92: 650-665.
- [23] 陈存礼, 杨鹏, 何军芳. 饱和击实黄土的动力特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1551-1556.
CHEN Cun-li, YANG Peng, HE Jun-fang. Research on dynamic characteristics of saturated compacted loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1551-1556.
- [24] 孙海妹, 王兰民, 王平, 等. 饱和兰州黄土液化过程中孔压和应变发展的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3464-3468.
SUN Hai-mei, WANG Lan-min, WANG Ping, et al. Experimental study of development of strain and pore water pressure during liquefaction of saturated Lanzhou loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3464-3468.
- [25] 张军, 郑俊杰, 曹文昭, 等. 循环荷载作用下饱和压实黄土动力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 322-327.
ZHANG Jun, ZHENG Jun-jie, CAO Wen-zhao, et al. Dynamic characteristics of saturated compacted loess under cyclic loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Suppl.1): 322-327.
- [26] 王谦, 王峻, 王兰民, 等. 石碑塬饱和黄土地震液化机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 4168-4173.
WANG Qian, WANG Jun, WANG Lan-min, et al. Discussion on mechanism of seismic liquefaction of saturation loess in Shibei tableland, Guyuan city[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Suppl.2): 4168-4173.
- [27] 代倩, 廖红建, 康孝森, 等. 动荷载下填方体压实黄土动应变与动孔压变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 1): 235-240.
DAI Qian, LIAO Hong-jian, KANG Xiao-sen, et al. Behaviors of dynamic strain and pore pressure of compacted loess in loess-filled foundation induced by dynamic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(Suppl.1): 235-240.
- [28] LIU Wei, WANG Qian, LIN Gao-chao, et al. Effect of pre-dynamic loading on dynamic liquefaction of undisturbed loess[J]. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 2020, 18(13): 5779-5806.
- [29] WANG Hao-jie, SUN Ping, LIU En-long, et al. Dynamic properties of Tianshui saturated remolded loess: a laboratory study[J]. **Engineering Geology**, 2020, 272: 105570.
- [30] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. MICP胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 38-45.
LIU Han-long, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(1): 38-45.
- [31] 陈伟, 孔令伟, 朱建群. 一种土的阻尼比近似计算方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 789-791.
CHEN Wei, KONG Ling-wei, ZHU Jian-qun. A simple method to approximately determine the damping ratio of soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Suppl.1): 789-791.