



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.02.024

曹鹏, 魏巍, 刘恩龙, 等. 饱和和重塑黄土的动力特性[J]. 2016, 14(2): 136-141, 147.

CAO Peng, WEI Wei, LIU En long, et al. Dynamic properties of saturated remolded loess [J]. 2016, 14(2): 136-141, 147. (in Chinese)

饱和和重塑黄土的动力特性

曹 鹏¹, 魏 巍², 刘恩龙¹, 李荣建³, 唐 勇¹

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院, 成都 610065;

2. 四川蜀禹水利水电工程设计有限公司, 成都 610000; 3. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048)

摘要: 基于饱和和重塑黄土的静、动力三轴试验结果, 探讨了饱和和重塑黄土的静、动力特性。分析了静力试验中饱和和重塑黄土的应力-应变关系。根据动力试验结果研究了饱和和重塑黄土轴向应变、动强度、有效应力路径和滞回圈的变化规律: 轴向应变随着振动次数的增加逐渐增大, 且变化曲线存在着明显转折点, 在较低围压时, ϵ_a 分为先平缓上升和后陡升至破坏两个阶段, 在较高围压时, ϵ_a 分为振动初期存在陡升然后平缓上升最后又陡升至破坏三个阶段。有效应力路径逐渐向左发展, 且移动幅度逐渐加大。每一个振次的有效应力路径形成一个封闭的区域, 试验过程中封闭区域的面积逐渐增大。随着振动次数逐渐增大, 滞回圈的面积和倾斜度均逐渐增大。通过动弹模试验结果发现饱和和重塑黄土在不同围压下 $1/E_d$ 均随着 ϵ_a 的增大而增大, 确定出不同围压下 $1/E_d \sim \epsilon_a$ 关系中的 a 、 b 值和最大动弹模 E_{dmax} ; 阻尼比 λ 随动应变 ϵ_a 的增大逐渐增大, 且最终趋于稳定, 给出不同围压下阻尼比 λ 的建议值, 从而为指导工程实践提供参考。

关键词: 饱和和重塑黄土; 轴向应变; 有效应力路径; 动弹模; 阻尼比

中图分类号: TV41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0136-06

Dynamic properties of saturated remolded loess

CAO Peng¹, WEI Wei², LIU En long¹, LI Rong jian³, TANG Yong¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Shuyu Water Conservancy and Hydropower Engineering Design Co. Ltd, Chengdu 610000, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Experiments on saturated remolded samples were carried out to study the static and dynamic properties of saturated remolded loess. The stress-strain curves of saturated remolded loess were analyzed in the static tests. Based on the results of dynamic triaxial experiments, the relationships among the axial strain, dynamic shear strength, effective stress paths, hysteresis loops and the number of loading cycles were studied. The results showed that the axial strain increased gradually with the number of cycles, and the axial strain curve variation had an inflexion point; under the lower confining pressure, the axial strain increased gently at the beginning then increase suddenly up to the failure of the samples; under the higher confining pressure, the axial strain exhibited a rapid increase at the outset and then the growth of the axial strain became slower, and increase sharply again at last of the axial strain. The effective stress paths gradually moved to left with the increase of cycles, and the degrees of movement increased gradually. The effective stress paths of each loading cycle consist of a closed area, and the region increased gradually. With the increasing of loading cycles, both the area and inclination of hysteresis loops increased gradually. Through

收稿日期: 2015-03-10 修回日期: 2016-03-02 网络出版时间: 2016-04-14
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1440.010.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(51009103)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51009103)

作者简介: 曹鹏(1991-), 男, 河南信阳人, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: cpdf041299@163.com

通讯作者: 刘恩龙(1976-), 男, 河南商丘人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土本构关系与数值模拟方面研究。E-mail: liuenlong@scu.edu.cn

the results from the dynamic elastic modulus tests of saturated remolded loess, we found that $1/E_d$ increases gradually with the axial strain under the different confining pressure, and the values of a, b and E_{dmax} was determined from the relationship between $1/E_d$ and ϵ_a . The damping ratio λ increase with the axial strain ϵ_a and reach to a stable value. The proposed values of λ under the different confining pressures are determined base on the results: which provides a reference for the engineering practice.

Key words: saturated remolded loess; axial strain; effective stress paths; dynamic elastic modulus; damping ratio

黄土在我国分布区域较广,我国的黄土总分布面积达 64 万 $\text{km}^{2[1]}$ 。黄土地区易发生许多地震灾害,主要包括滑坡、震陷和液化,给国家带来了极大的损失,所以对黄土的动力特性进行研究意义非常重大。谢定义^[2]认为深入研究黄土力学特性的基础理论很有必要,这些理论将支撑黄土力学特性的研究。黄土作为一种连续介质,受力后产生弹塑性变形。刘祖典等^[1]基于陕西关中黄土的三轴试验结果,认为原状黄土的应力-应变曲线一般呈现出三种类型。且涉及黄土力学性质的工程的快速发展迫切要求对黄土的动力特性展开研究,黄土力学应该有自己单独的理论基础^[3]。谢定义、巫志辉和段汝文等^[4-6](1979年-1985年)基于对黄土施加等幅正弦循环荷载的动力三轴试验结果,对黄土的动强度及应力-应变曲线等力学特性进行了深入研究。王兰民、王峻等^[7-11](1991年-1994年)对黄土施加随机地震荷载,研究了黄土的动本构模型、弹性模量、阻尼比等一系列力学特性,并对比了黄土动力参数在不同地震荷载下的不同。刘保健等^[12]根据压实黄土的动三轴试验结果,分析了围压等因素对压实黄土应力特性的影响;陈存礼等^[13]研究了击实新疆饱和黄土的动强度及动模量等动力特性;李又云等^[14]基于动三轴试验结果,探讨了干密度、含水率等因素对压实黄土动力特性的影响;骆亚生等^[15-18]总结前人对黄土动力特性研究的成果,然后较为全面地考察了中国典型黄土的动力特性;张军等^[19]通过饱和击实黄土的动三轴试验结果,分析了动力三轴试验中饱和压实黄土的超孔隙水压力、有效应力路径、滞回圈和轴向应变的变化规律。

为更好地了解黄土的力学特性,并与原状黄土动力试验进行对比,本文控制饱和重塑黄土试样的干密度与原状黄土相同,并进行了静、动三轴试验,探讨了动力试验中饱和重塑黄土的有效应力路径、滞回圈、轴向应变的发展规律。

1 试验方法

1.1 制样

饱和和重塑土样,采用击实法制备试样。先将原

状土风干,利用木锤将原状土碾碎但注意不能压碎颗粒,将碾碎后的土样过 2 mm 筛,根据重塑黄土的干密度,计算所需重塑黄土的质量。为了与原状黄土动力试验进行对比,本次试验所取重塑黄土干密度与原状黄土相同为 1.41 g/cm^3 ,研究该干密度下饱和和重塑黄土的动力学特性。试样的直径和高度分别为 50 mm 和 100 mm。然后称取一定质量的重塑黄土,分四层击实,每一层击 4 下,控制每层的击实厚度为 2.5 cm,层与层之间要进行刮毛,确保每层土接触良好,以保证试样具有良好的整体性。将击实完成后的土样按照操作步骤^[20]安装在试验仪器上如图 1 所示。然后对试样进行饱和,由于该黄土抽气饱和之后很软,制样难以成形,经反复尝试后,试验决定采用水头饱和(先抽气饱和 1 h,立即取出试样,防止试样过软,然后置于仪器上进行水头饱和),首先对试样施加 20 kPa 的围压。然后提高进水管的水位,控制进水管的水面与黄土试样中部之间的水位差为 1 m 左右。打开进水阀,使水从底部进入试样,从试样顶部缓缓溢出。饱和完成后,在不排水的条件下施加周围压力,检查孔压系数 B 值可以达到 0.90~0.95,确保试样饱和度基本达到要求。



图 1 试样安装

Fig. 1 Installation of the sample

1.2 试验内容

饱和和重塑黄土静力试验和动力试验均做 3 组,偏压固结($K_c = \alpha_c/\alpha_{3c} = 1.5$,围压 $\alpha_{3c} = 50、100、200\text{kPa}$)。具体试验安排见表 1 和表 2。

表 1 静力试验

Tab. 1 The monotonic triaxial test

围压/kPa	固结应力比 K_c
50	1.5
100	1.5
200	1.5

表 2 动力试验

Tab. 2 The dynamic triaxial test

参数	情况 1	情况 2	情况 3
围压/kPa	50	100	200
固结应力比/ K_c	1.5	1.5	1.5
	70	150	250
激振力 PP/kPa	80	180	270
	100	200	290

静、动力试验均采用 GCTS 伺服控制气压式激振三轴仪。该三轴仪可以直接数字伺服控制轴向荷载、围压和孔隙水压,其中轴向动荷载通过气压施加,围压通过气压或水压施加。试验过程完全由计算机软件来控制,试验数据数字化,并且试验软件可以进行基本的图形显示以及向其它软件如 Excel 输出数据,试验仪器见图 2。静、动力试验均进行的是不排水试验。静力试验的剪切速率为 0.06 mm/min 。动力试验先在偏压状态下进行固结,固结完成后,关闭排水阀,然后进行振动试验,施加的循环动偏应力的加载波形为等幅正弦波,频率为 1 Hz 。

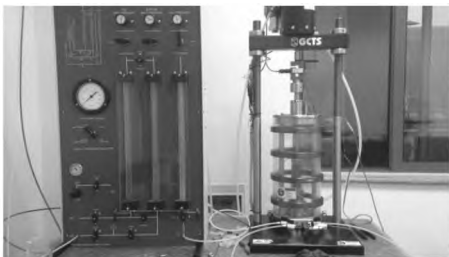


图 2 GCTS 三轴仪

Fig. 2 GCTS triaxial apparatus

2 试验结果及分析

2.1 静力试验结果

在静力试验中,饱和重塑黄土应力应变曲线见图 3。从图中可以看出,饱和重塑黄土的应力-应变曲线均为弱软化型,偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 先随着应变的增大逐渐增大直至达到峰值,然后 $\sigma_1 - \sigma_3$ 继续增大, $\sigma_1 - \sigma_3$ 反而减小。且围压 σ_3 增大,试样的峰值强度提高,残余强度也增大,但应力-应变曲线的软化程度减小。

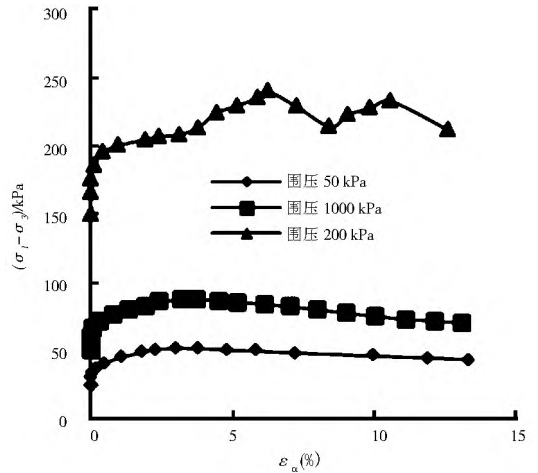
图 3 不同围压下饱和重塑黄土 $\sigma_1 - \sigma_3 - \epsilon_a$ 关系曲线

Fig. 3 The stress strain curve of saturated remolded loess under different confining pressures

2.2 动力试验结果

饱和重塑黄土动力试验轴向应变 ϵ_a 与振次 N 的关系曲线见图 4。从图中可以看出,当 $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$ 、 100 kPa 、 200 kPa 时,轴向应变 ϵ_a 随着振次 N 的增大逐渐增大,分为先平缓上升后陡升至破坏明显的两个阶段,轴向应变 ϵ_a 先随着振次 N 的增加平缓地增大,到达一定振次后 ϵ_a 发生陡升直至试样破坏,轴向应变曲线出现明显转折点。当 $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ 时,轴向应变 ϵ_a 在振动开始时就发生陡升,中间变为平缓增加,到达一定振次 N 时 ϵ_a 又发生陡升直至试样破坏。这是因为当围压 σ_3 较大时,试样固结时偏应力较大,轴向变形较大,当振动开始时,试样存在一个短暂的调整状态,从而表现为 ϵ_a 在振动初始时发生陡升,然后逐渐变为平缓,并最终又陡升直至试样破坏。

饱和重塑黄土动强度曲线见图 5。因为重塑黄土在不同围压条件下动应力应变曲线可能呈现不同的形态,为了达到破坏标准的统一,本文采用屈服应变标准,即将试样轴向应变 ϵ_a 突然增大时所对应的振次 N 作为破坏振次。从图中可以看出,试样的动强度随着围压的增大而增大,在相同振次下,试样围压越大,试样的动强度也越大。在同一固结应力条件下,试样的振动次数越多,对应的动强度越小;振动次数越少,动强度越大。

土体的破坏特性可以由试样的应力路径很好地反映出来。三组围压下试样的有效应力路径和滞回圈的变化规律类似,本文基于围压 50 kPa 、激振力为 70 kPa 条件下试样的试验结果来探讨饱和重塑黄土的动力特性。图 6 为饱和重塑黄土在动三轴试验中有效应力路径的变化规律。为了判断饱和和重塑

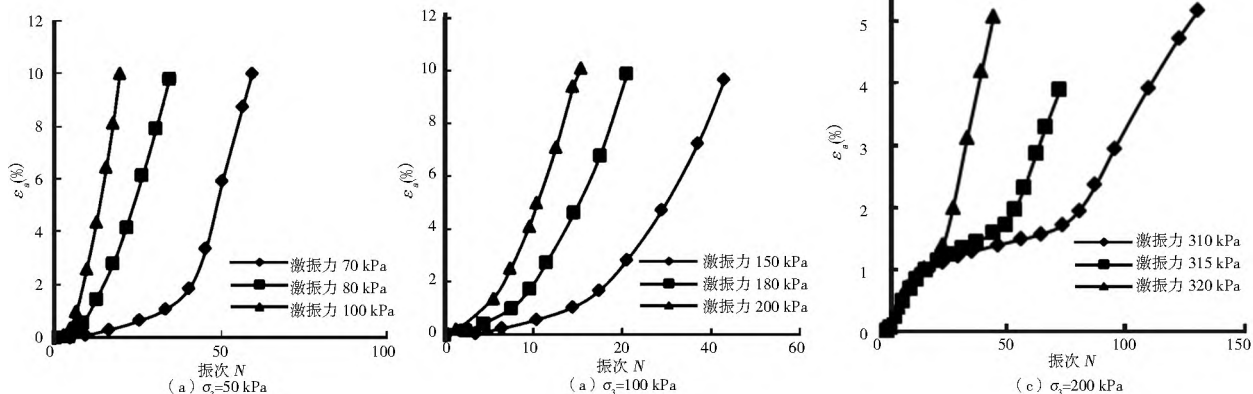
图4 不同围压下饱和和重塑黄土的 $\varepsilon_d \sim N$ 关系曲线

Fig. 4 Relationship between the axial dynamic strain and number of cyclic vibration of saturated remolded loess under different confining pressures

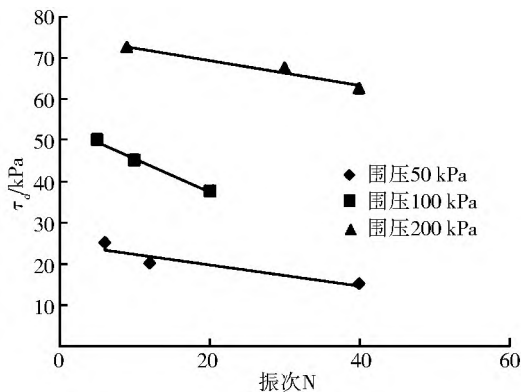
图5 不同围压下饱和和重塑黄土的 $\tau_d \sim N$ 关系曲线

Fig. 5 Dynamic strength curve of saturated remolded loess under different confining pressures

黄土在动力试验中有效应力路径的变化规律,图6选取了4组具有代表性的振动次数: $N = 1$ 次、10次、35次和50次。从图6可以看出,饱和和重塑黄土在动三轴试验中有效应力路径逐渐向左发展,移动的幅度逐渐加大,说明试样随着循环振次的增加逐渐地接近破坏状态。且每一个振动周期的有效应力路径形成各自单独的封闭区域。在 $N = 1$ 时,试样的有效应力路径为一条直线,说明试样未发生较大变形,但随着振次的增大,封闭区域的面积在逐渐增大,试样逐渐接近破坏状态。

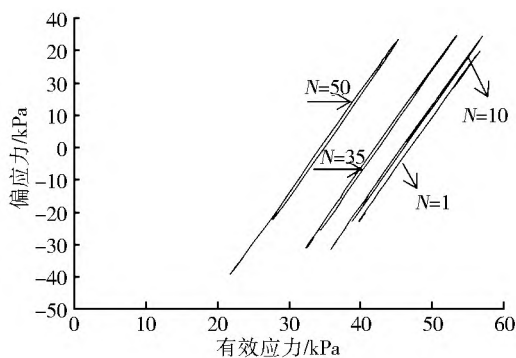


图6 饱和和重塑黄土动力试验的有效应力路径

Fig. 6 Effective stress paths of saturated remolded loess under dynamic experiment

图7为饱和和重塑黄土动力试验在围压50 kPa, 激振力为70 kPa 状态下滞回圈的变化曲线。同样选取了5组具有代表性的振次下试样的滞回圈: $N = 5$ 次、10次、20次、25次和40次。从图中可以发现,饱和和重塑黄土在动三轴试验中滞回圈逐渐向右移动,滞回圈的移动幅度明显加快。当振次较小时,滞回圈差异很小,当振次增大到一定值后,滞回圈的差异逐渐增大。开始时试样滞回圈的面积很小,随着振次逐渐增加,滞回圈的面积和倾斜度也越来越大,说明试样逐渐接近破坏状态。且试样的压缩应变累积速度更快,说明试样逐渐被压缩直至破坏。

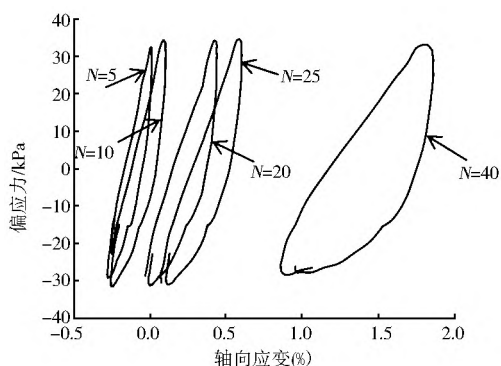


图7 饱和和重塑黄土动力试验的滞回圈

Fig. 7 Hysteresis loops of saturated remolded loess under dynamic experiment

2.3 动模量试验结果

土作为一种非连续介质,其动应力-动应变曲线为双曲线型。将该双曲线上每点处的割线模量称之为土的动模量。通常情况下动模量随应变的增大而减小。已有研究表明动模量的倒数 $1/E_d$ 与动应变 ε_d 之间的关系可近似采用公式(1)拟合,即

$$1/E_d = a + b\varepsilon_d \quad (1)$$

式中: a 、 b 分别为拟合直线的截距和斜率。当 $\varepsilon_d = 0$

时, $1/a$ 即代表最大的动弹性模量 E_{dmax} 。

根据试验结果绘制饱和重塑黄土在 $K_c = 1.5$ 时, $1/E_d \sim \varepsilon_d$ 关系曲线, 见图 8, 从图 8 中可以看出, 饱和重塑黄土在不同围压下 $1/E_d$ 均随着 ε_d 的增大而增大, 说明动模量 E_d 随着 ε_d 的增大而减小。由饱和重塑黄土的 $1/E_d \sim \varepsilon_d$ 关系曲线可以得到不同围压下的 a 、 b 值见表 3, 从表 3 中可以发现, 随着围压的增大, a 、 b 值均在减小。由 a 、 b 值进而可以确定出饱和重塑黄土在不同围压下的最大动弹模 E_{dmax} 见表 4, 从表 4 中可以得到, 最大动弹模随着围压 σ_3 的增大而增大。该力学参数可以为工程实践提供一定参考依据。

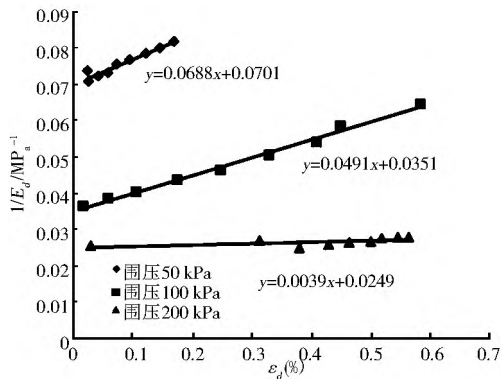


图 8 不同围压下的 $1/E_d \sim \varepsilon_d$ 关系曲线
Fig. 8 The relationship between $1/E_d$ and ε_d under the different confining pressure

表 3 动模量试验中得到的 a 、 b 值(饱和)
Tab. 3 The values of a and b calculated from the experiment on dynamic elastic modulus

σ_3	a (MPa^{-1})	b (MPa^{-1})
50kPa	0.0701	6.88
100kPa	0.0351	4.91
200kPa	0.0249	0.39

表 4 最大动弹性模量 E_{dmax}

Tab. 4 The maximum of dynamic elastic modulus

围压/kPa	50	100	200
E_{dmax}/MPa	14.27	28.49	40.16

最大动弹模 E_{dmax} 与周围固结压力之间的关系可由公式(2)计算:

$$E_{dmax} = KP_a \left(\frac{\sigma_m}{P_a} \right)^n \quad (2)$$

式中: K 、 n 为试验常数; P_a 为大气压力; $\sigma_m = \sigma_1 + 2\sigma_3/3$

由公式(2)可以得到, 饱和重塑黄土的试验参数值 $K = 303.24$, $n = 1.4219$ 。

2.4 阻尼比试验结果

土体在受循环荷载作用下, 由于土体的内

摩擦作用导致其应力-应变曲线呈现出滞后性, 因而表现为滞回圈现象。由公式(3)可以求得土体阻尼比 λ :

$$\lambda = \frac{A_L}{4\pi A_T} \times 100 \quad (3)$$

式中: A_L 为滞回圈的面积, 如图 9 所示; A_T 为阴影部分三角形的面积。

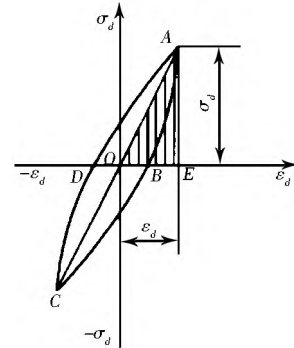


图 9 滞回圈

Fig. 9 Hysteresis loops

根据试验结果绘制饱和重塑黄土在 $K_c = 1.5$ 时, 阻尼比 λ 随动应变 ε_d 的关系曲线见图 10, 从图 10 中可以看出, 阻尼比 λ 随动应变 ε_d 的增大逐渐增大, 且最终达到一个稳定值。并根据试验结果, 给出了该饱和重塑黄土在 $K_c = 1.5$ 时, 不同围压下阻尼比 λ 的建议值见表 5, 从而为工程实践提供了一定的试验参考。

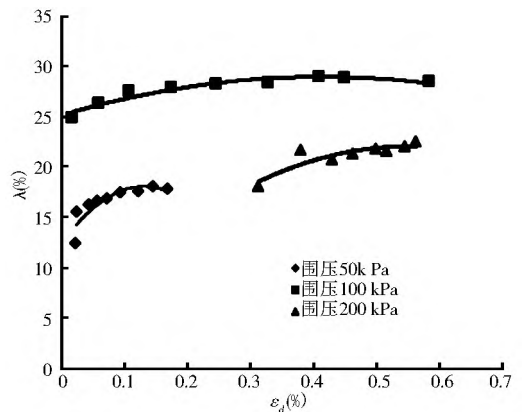


图 10 不同围压下 $\lambda \sim \varepsilon_d$ 关系曲线

Fig. 10 The relationship between λ and ε_d under the different confining pressure

表 5 不同围压下阻尼比 λ 的建议值

Tab. 5 The proposed value of λ under the different confining pressure

σ_3/kPa	$\lambda_{max}(\%)$	$\lambda(\%)$	$\lambda_{min}(\%)$
50	18.0	16.0	14.0
100	28.0	26.5	25.0
200	22.0	20.5	19.0

3 结论

(1) 饱和重塑黄土在不同围压下轴向应变 ε_a 均随振次的增加而增大; 在较低围压时, ε_a 分为先随振次 N 平缓上升和后陡升直至破坏两个阶段, 在较高围压下, ε_a 初始时即发生陡升, 中间变为平缓上升后又变为陡升直至试样破坏。

(2) 在动力试验中, 饱和重塑黄土的有效应力路径逐渐向左移动, 且移动幅度随着振次的增大逐渐加大。每一个振次的有效应力路径组成一个封闭的区域, 随着振动次数的增大, 封闭区域的面积逐渐增大。试样逐渐接近破坏状态。

(3) 在振动次数很小时, 滞回圈的差异很小, 当达到一定振次时, 滞回圈的面积和倾斜度均逐渐增大, 试样逐渐被压缩直至破坏。

(4) 动弹模随着轴向应变的增大逐渐减小, 并根据动弹模试验结果, 确定出不同围压下最大动弹模量值, 进而给出了饱和重塑黄土的试验参数 K 、 n 值。

(5) 阻尼比随着轴向应变的增大逐渐增大, 最终趋于稳定。根据试验结果给出了不同围压下饱和重塑黄土阻尼比的建议值。

参考文献(References):

[1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1996. (LIU Zr dian. Mechanics and Engineering of Loess[M]. Xi'an: Shanxi Science Press, 1996. (in Chinese))

[2] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去, 现在与未来[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 273-283. (XIE Ding yi. The past, the present and the future of the loess mechanics characteristic and its application investigation[J]. Underground Space, 1999, 19(4): 273-283. (in Chinese))

[3] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13. (XIE Ding yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13. (in Chinese))

[4] 巫志辉, 谢定义, 余雄飞, 等. 洛川黄土动变形强度特性的研究[J]. 水利学报, 1994(12): 67-71. (WU Zhi hui, XIE Ding yi, YU Xiong fei, et al. Study on dynamic deformation and strength characteristics of Luochuan loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(12): 67-71. (in Chinese))

[5] WU Zhi hui, XIE Ding yi. Further research of dynamic characteristics of intact loess[C]. International Conference on Loess, 1985.

[6] 陈国兴, 谢君斐, 张克绪. 土的动弹性模量和阻尼比的经验估计[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(1): 73-84. (CHEN Guo xing, XIE Jun fei, ZHANG Ke xu. The empirical evaluation of soil modulus and damping ratio for dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(1): 73-84. (in Chinese))

[7] 王兰民, 石玉成, 刘旭, 等. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社,

2003. (WANG Lan min, SHI Yu cheng, LIU Xu, et al. Loess Dynamics[M]. Beijing: China Seismological Press, 2003. (in Chinese))

[8] 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. (in Chinese))

[9] 王兰民, 张振中. 随即地震荷载作用下黄土动强度的试验方法[J]. 西北地震学报, 1991, 13(3): 50-55. (WANG Lan min, ZHANG Zhen zhong. Test method of dynamic strength of loess under random seismic load[J]. Northwestern Seismological Journal 1991, 13(3): 50-55. (in Chinese))

[10] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531-536. (SHAO Sheng jun, ZHOU Fei fei, LONG Ji yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531-536. (in Chinese))

[11] 田堪良, 张慧莉, 张伯平, 等. 动扭剪荷载作用下非饱和黄土动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4151-4155. (TIAN Kan liang, ZHANG Hui li, ZHANG Bo ping, et al. An experimental study on dynamic properties of unsaturated loess under dynamic torsional shear[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4151-4155. (in Chinese))

[12] 刘保健, 张晓荣, 程海涛. 应变控制下压实黄土的动三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1073-1076. (LIU Bao jian, ZHANG Xiao rong, CHENG Hai tao. Study on compacted loess under strain control at dynamic triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1073-1076. (in Chinese))

[13] 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): 1511-1556. (CHENG Cun li, YANG Peng, HE Jun fang. Research on dynamic characteristics of saturated compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1511-1556. (in Chinese))

[14] 李又云, 谢永利, 刘保健. 路基压实黄土动力特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1037-1046. (LI You yun, XIE Yong li, LIU Bao jian. Experimental research on dynamic characteristics of roadbed compaction loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1037-1046. (in Chinese))

[15] 骆亚生, 谢定义, 李永红. 原状黄土的动三轴试验研究与探讨[A]. 湿陷性黄土研究与工程[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 116-122. (LUO Ya sheng, XIE Ding yi, LI Yong hong. Experimental study and exploration of dynamic triaxial test of intact loess[A]. Collapsible loess study and engineering[C]. Beijing China Building Industry Press, 2000: 116-122. (in Chinese))

[16] 骆亚生. 中国典型黄土动力特性及其参数的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2000. (LUO Ya sheng. Test analysis of dynamic characteristic and parameter of some typical loess in China[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000. (in Chinese))

(下转第 147 页)

- optimal pump scheduling problem [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(9): 16-19. (in Chinese)
- [8] 袁尧, 刘超. 基于蚁群算法的泵站运行优化及投影寻踪选优策略[J]. 农业机械学报, 2013(3): 38-44. (YUAN Yao, LIU Chao. Pump operation optimization and projection pursuit evaluation strategy based on ant colony optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013(3): 38-44. (in Chinese))
- [9] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. MA: Addison Wesley, 1989: 1-83.
- [10] 许义海, 李晓东. 一种快速寻优的新型改进遗传算法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2006(2): 36-40. (XU Yi hai, LI Xiaodong. A new improved genetic algorithm to obtain solutions quickly[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2006(2): 36-40. (in Chinese))
- [11] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. (WANG Xiaoping, CAO Liming. Genetic algorithm—theory, application and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an Communication University Press, 2002. (in Chinese))
- [12] 张忠波, 吴学春, 张双虎, 等. 并行动态规划和改进遗传算法在水库调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2014(4): 21-27. (ZHANG Zhongbo, WU Xuechun, ZHANG Shuanghu, et al. Parallel dynamic programming and improved genetic algorithm and their application to reservoir operation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014(4): 21-27. (in Chinese))
- [13] 杜敦萌, 刘芹, 方国华, 等. 基于多项式—马尔科夫的水泵性能曲线拟合[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 1-3. (DU Dunmeng, LIU Qin, FANG Guohua, et al. Pump characteristic curve fitting based on Polynomial Markov[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7): 1-3. (in Chinese))
- [14] 张忠波, 张双虎, 蒋云钟. 结合广度搜索的遗传算法在水库调度中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2011(5): 85-88. (ZHANG Zhongbo, ZHANG Shuanghu, JIANG Yunzhong. Genetic algorithm based on deep search and its application to reservoir optimal operation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011(5): 85-88. (in Chinese))
- [15] 鄢碧鹏, 杜晓雷, 刘超, 等. 基于遗传算法和神经网络的泵站经济运行研究[J]. 农业机械学报, 2007(1): 80-82. (YAN Bipeng, DU Xiaolei, LIU Chao, et al. Optimal operation of pumping stations based on genetic algorithms and artificial neural networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007(1): 80-82. (in Chinese))
- [16] 王宏江, 陆桂华. 遗传算法在尔王庄枢纽泵站优化调度中的应用[J]. 水利水电技术, 2003(3): 50-53, 65. (WANG Hongjiang, LU Guohua. Application of genetic algorithm in optimal operation of pumping stations of Erwangzhuang hydro system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003(3): 50-53, 65. (in Chinese))
- [17] 冯晓莉, 仇宝云, 黄海田. 大型泵站经济运行研究进展[J]. 流体机械, 2006(4): 32-37. (FENG Xiaoli, QIU Baoyun, HUANG Haitian. Research headway on large pump station economical operation[J]. Fluid Machinery, 2006(4): 32-37. (in Chinese))
- [18] 周琪慧, 方国华, 吴学文, 等. 基于遗传投影寻踪模型的泵站运行综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015(5): 985-989. (ZHOU Qihui, FANG Guohua, WU Xuewen, et al. Comprehensive assessment of pump station operation based on genetic projection pursuit model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(5): 985-989. (in Chinese))
- [19] 黄海田, 冯晓莉, 仇宝云. 南水北调东线泵站全站运行效率分析[J]. 南水北调与水利科技, 2005(3): 11-14, 26. (HUANG Haitian, FENG Xiaoli, QIU Baoyun. Analysis on total station operating efficiency of the eastern route of south to north water transfer project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005(3): 11-14, 26. (in Chinese))
- [20] 计欣. 基于动态规划方法的取水泵站运行调度策略[D]. 上海: 同济大学, 2007. (JI Xin. The operation scheduling strategy of raw water pumping station based on dynamic programming[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))

(上接第 141 页)

- [17] 骆亚生, 李瑞, 田堪良. 非饱和黄土动力特性试验方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1041-1045. (LUO Yasheng, LI Rui, TIAN Kanliang. Research on method of dynamic characteristics tests for unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1041-1045. (in Chinese))
- [18] 骆亚生, 谢定义, 董为民, 等. 不同地区黄土振陷变形特性的对比分析[J]. 陕西水利发电, 2001, 17(1): 4-7. (LUO Yasheng, XIE Dingyi, DONG Weimin, et al. Comparative analysis of the vibration deformation behavior of the loess from the different regions[J]. Journal of Shanxi Water Power, 2001, 17(1): 4-7. (in Chinese))
- [19] 张军, 郑俊杰, 曹文昭, 等. 循环荷载作用下饱和和压实黄土动力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 321-327. (ZHANG Jun, ZHENG Junjie, CAO Wenzhao, et al. Dynamic characteristics of saturated compacted loess under cyclic loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 321-327. (in Chinese))
- [20] SL 237-1999. 土工试验规程[S]. (SL 237-1999. Rules of geotechnical testing[S]. (in Chinese))