

宋丙辉, 谌文武, 吴玮江, 等. 不同含水率下滑坡滑带土动力特性试验研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(4): 0744-0749. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0744

SONG Bing-hui, CHEN Wen-wu, WU Wei-jiang, et al. Experimental Study on the Dynamic Properties of Sliding Zone Soil of a Landslide under Varying Water Content[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 0744-0749. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0744

不同含水率下滑坡滑带土动力特性试验研究^①

宋丙辉^{1,2}, 谌文武^{1,2}, 吴玮江^{1,3}, 江耀^{1,2}

(1. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 甘肃舟曲泄流坡滑坡地处活跃断层破裂带内, 断层活动控制着该滑坡的发育和运动。为了研究该滑坡滑带土的动力特性, 采用重塑滑带土样, 在固结不排水条件下, 利用分级循环加载法开展动三轴试验, 重点探讨含水率的变化对滑带土动力特性的影响规律。试验结果表明: 含水率一定时, 泄流坡滑坡滑带土的动弹性模量随动应变的增大呈指数形式减小; 动应变一定时, 动弹性模量随含水率的增大而不断减小, 且衰减速率随含水率的增大而增大; 含水率并不影响动弹性模量-动应变关系曲线的形态, 不同含水率下该关系曲线可以进行归一化。滑带土阻尼比随含水率的增大而增大, 阻尼比-动应变关系曲线也具有归一化特征。不同含水率下泄流坡滑带土动应力-应变本构关系可以用双曲线模型进行描述。

关键词: 泄流坡; 滑带土; 动力特性; 含水率; 动三轴试验

中图分类号: P642.11⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)04-0744-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0744

Experimental Study on the Dynamic Properties of Sliding Zone Soil of a Landslide under Varying Water Content

SONG Bing-hui^{1,2}, CHEN Wen-wu^{1,2}, WU Wei-jiang^{1,3}, JIANG Yao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, the Ministry of Education of China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;
3. Geological Hazards research and prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Xieliupo landslide is in an active and ruptured fault zone, and its growth and movement are controlled by the active fault. Historically, the combined effect of earthquakes and rain-fall has repeatedly activated the landslide, causing severe damage to life and property. Hence, it is important to evaluate the dynamic stability of the Xieliupo landslide for mitigation of the hazards. The sliding zone soil, viewed as one of the major components of a landslide, is always perceived as a key factor in keeping the landslide stable and steady. To investigate the dynamic properties of the sliding zone soil of the Xieliupo landslide, remolded specimens of various water con-

① 收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB744701); 国家自然科学基金地区科学基金项目(41362014)

作者简介: 宋丙辉(1986—), 男, 山东枣庄人, 博士研究生, 从事岩土地震工程方面研究。E-mail: songbh05@qq.com。

通信作者: 谌文武(1966—), 男, 河南信阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事地质工程、岩土工程和文物保护工程方面研究。

E-mail: sungp@lzu.edu.cn。

tents are tested on a cyclic triaxial apparatus under consolidated and undrained conditions using a step-by-step method to increase the dynamic load. The test results show that the dynamic elastic modulus of the sliding zone soil decreases exponentially with the increase of shear strain under constant water content. As the water content increases, the dynamic elastic modulus of the slip soil also decreases continuously under the same confining pressure and its deterioration velocity increases with increased water content. It seems that there is a threshold water content (around the plastic limit) in describing the variation of maximum elastic modulus with water content. The maximum dynamic elastic modulus of the slip soil, calculated from the cyclic triaxial test results, initially reduces slowly with water content, but when the water content is above the plastic limit, it abruptly decreases with further increase of the water content. Additionally, the relationship between dynamic elastic modulus and dynamic strain under different water content could be perfectly normalized, referring to the maximum dynamic elastic modulus. The damping ratio of the slip soil increases with shear strain and under the same confining pressure, the damping ratio increases as the water content increases. The relations between damping ratio and dynamic shear strain of the slip soil could also be normalized based on the maximum damping ratio. Based on the analysis of the cyclic triaxial test results, it can be concluded that the backbone curves of dynamic stress against strain for the sliding zone soil of the Xieliupo landslide could be described using the conventional hyperbolic model.

Key words: xieliupo; sliding zone soil; dynamic properties; water content; cyclic triaxial test

0 引言

甘肃舟曲县泄流坡滑坡位于葱地—舟曲—化马走向断裂破碎带内,受长期活跃地壳运动的影响,滑体内岩体结构变形破坏强烈,劈理、揉皱等变形现象非常发育。历史上舟曲县周边区域发生过多次强烈地震,其中1654年天水8级地震、1718年通渭7.5级地震、1879年武都8级地震、1920年宁夏海原8.5级地震和2008年四川汶川8.0级地震等5次破坏性大地震对研究区山体结构破坏很大,不仅引发了大量新的山崩、滑坡等地震次生灾害,同时加剧了原有地质灾害的危险程度^[1-2]。滑带土作为滑坡体重要的组成部分在滑坡整体稳定性评价中起着决定性作用。泄流坡滑坡滑带土主要由完全风化和强风化的泥盆系、石炭系页岩、炭质千枚岩等岩土体组成,遇水易软化、泥化,力学性质很差,属于甘南地区滑坡及泥石流等地质灾害易发多发岩组^[3-4]。关于该类滑带土的静力特性已有较广泛的研究^[5-6],但动力特性研究却少有涉及,严重制约着研究区内滑坡综合防治工作的科学有序开展,亟需进一步加深研究和讨论。

关于滑带土的动力特性,晏鄂川等^[7]通过动三轴试验发现在小应变范围内,不同固结压力下滑带土重塑样的动应力和动应变关系基本满足双曲线模型;杨喆^[8]利用动三轴仪研究了黄土滑坡滑带土的

动力特性,结果发现等压固结下,黄土的动弹性模量随动应变的增大逐渐减小,而动应变一定的情况下,动弹性模量随初始固结应力的减小而快速减小。泄流坡滑坡作为发育于活动断裂带上、长期缓慢活动并伴随间歇性剧烈滑动的巨型滑坡,断裂活动和降雨是其发生大规模滑动的主要诱发因素,地震和坡脚开挖等对滑坡的发展、演化起到促进作用^[9-10]。有关研究^[11]发现含水率对滑带土的抗剪强度影响很大,滑带土具有较高的水敏感性。因此,本文拟对该滑坡滑带土在不同含水率下的动力特性开展动三轴试验研究,重点分析讨论滑带土动剪切模量和阻尼比的水敏感性特征以及动力曲线的归一化特征,以期进一步丰富滑坡滑带土的动力特性研究,并为同类滑坡的动力稳定分析和综合治理提供一定的科学参考。

1 试验研究

1.1 滑带土的物理性质

由于白龙江水下切侵蚀作用,泄流坡滑坡滑动带前端暴露在外,这一方面方便了现场取样工作,但另一方面也导致所取土样无法真实反映滑体内部实际滑带土的富水状态,主要表现在所取土样含水率较小($<5\%$),而实际滑带物质常处于饱和软塑状态,含水率介于塑限和液限之间。由于砾粒的存在,

滑带土的密度较大,平均值约为 2.11 g/cm^3 ,土颗粒比重平均值为 2.74 ,塑限为 16.78% ,液限为 31.71% 。滑带土颗粒分布曲线如图 1 所示。由图 1 可知,泄流坡滑坡滑带土颗粒粒径两极分化较明显,缺少中间砂粒粒径,粒径 $> 2\text{ mm}$ 的砾粒约占 23.3% , $0.075\text{ mm} \geq$ 粒径 $> 0.005\text{ mm}$ 的粉粒约占 30.3% ,粒径 $\leq 0.005\text{ mm}$ 的黏粒约占 42.4% ,不均匀系数 $C_u > 5$,曲率系数 $C_c = 6.99$,属不良级配,根据《土工试验规程(SL237-1999)》中关于土的工程分类规定,土类别为含砾低液限黏土。

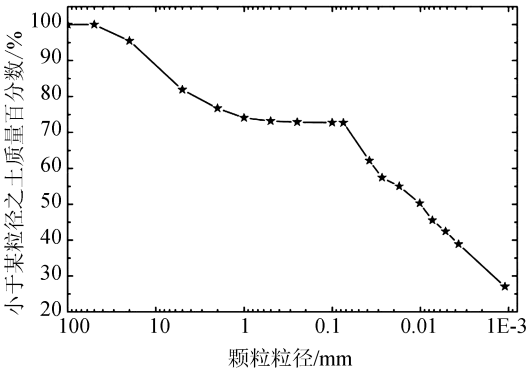


图 1 泄流坡滑坡滑带土颗粒分布曲线

Fig.1 Distribution curve of particle size of sliding zone soil of Xieliupo landslide

1.2 试样制备

由于动三轴试验对土样颗粒粒径的限制要求,同时考虑到滑带土主要由小于 2 mm 的颗粒组成,因此在制备重塑土样之前先进行筛分,取 2 mm 筛下余土分别配置不同含水率下散土样,并用保鲜袋密封保存 48 h ,以保证散土内部含水率的均匀分布。表 1 列出了各个土样的预估含水率和实测含水率。在粒度和密实度相同情况下,不同的试样制备方法会引起土结构的不同,对土的动力特性影响很大,为避免这种情况,重塑土样采用统一的模具严格按照击样法的步骤分 5 层进行击实,以尽可能减小试样制备方法对土样结构的影响,而且层与层之间连接处进行刨毛,以保证重塑土样的连续性和完整性。最后制备成型的圆柱体试样直径为 50 mm ,高 100 mm 。

表 1 重塑土样物理指标

Table 1 Physical properties of remolded specimens					
土样编号	预估含水率/%	实际含水率/%	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙比 e	饱和度/%
X1	12	11.4	1.6	0.713	43.84
X2	16	15.6	1.6	0.713	59.99
X3	19	18.6	1.6	0.713	71.53

1.3 试验方案

本次试验在中国地震局兰州地震研究所与天水红山试验机有限公司共同研制的 20 kN 动三轴试验机上进行。试验循环荷载采用等幅正弦波加载,振动频率为 1 Hz ,排水条件为不排水。

在进行循环加载试验之前,需对土样进行固结,以模拟实际土体所处的应力状态。根据取样点所处滑坡地质剖面图上的位置(图 2),确定本次动三轴试验的固结围压取 60 kPa ,偏压固结比为 1.67 。固结稳定标准依据《土工试验规范(SL237-1999)》的规定,以 30 min 内轴向变形不超过 0.01 mm 为准。为得到较大应变幅值范围内土的动力特性,采用分级循环加载方案,将应力幅值分成多级,逐级施加到试样上。已有研究表明^[12],这种分级加载方式得到的土动剪切模量和阻尼比曲线是可靠的。本次动三轴试验动应力加载方案如表 2 所列。

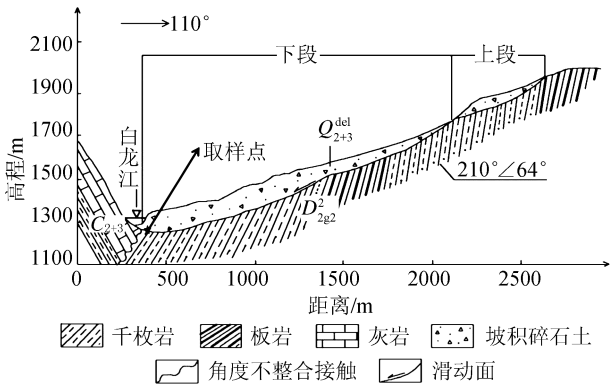


图 2 泄流坡滑坡剖面图

Fig.2 Profile of Xieliupo landslide

表 2 动应力加载方案

项目	土样编号		
	X1	X2	X3
围压/kPa	60	60	60
轴压/kPa	100	100	100
振级	10	10	20
每级振次	10	10	10
初始动应力/kPa	5	5	2.5
动应力加荷幅度/kPa	5	5	2.5

2 试验结果分析

动弹性模量和阻尼比是两个非常重要的表征土动力性质的参数,其主要影响因素有平均有效应力、孔隙比、饱和度、超固结比、土的种类以及土的结构性等^[13]。依据本文研究目的,下面主要从含水率角度来探讨其对泄流坡滑坡滑带土动力特性的影响规律。

2.1 滑带土的动弹性模量

根据动三轴试验结果可以绘制滑带土动弹性模量和动应变关系曲线(图 3)。

由图 3 可知,不同含水率下滑带土动弹性模量随动应变衰减的趋势是相似的,在初始较小应变范围内,动弹性模量衰减很快,随着动应变的增大,衰减速率变小,曲线渐趋平缓,最终趋于稳定。另一方面,泄流坡滑带土的动弹性模量具有比较明显的水敏性特征。当土样含水率介于 11.4%~15.6%之间,即低于塑限时,滑带土动弹性模量随含水率的增大而稍稍减小,下降幅度小于 10%;当土样含水率进一步增大至 18.6%,即高于塑限时,滑带土动弹性模量急剧下降,降低幅度超过 35%。由此可知,泄流坡滑带土动弹性模量对含水率的敏感度较高,在土体塑限附近存在该模量衰减速率拐点。

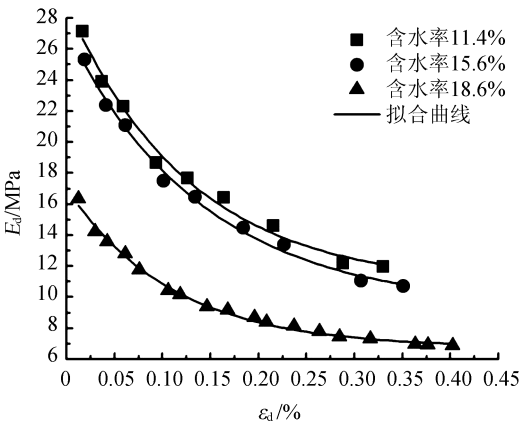


图 3 动弹性模量-动应变关系曲线
Fig.3 Relationships between E_d and ϵ_d

总之,含水率并不影响泄流坡滑带土动弹性模量-动应变关系曲线的形态,但对动弹性模量的大小影响显著。

为了定量地描述滑带土动弹性模量与动应变间相关关系,采用指数函数构建动弹性模量衰减模型,即

$$E_d = Ae^{(-\epsilon_d/B)} + C \tag{1}$$

式中: A 、 B 和 C 均为模型拟合参数。

运用式(1)对试验数据进行曲线拟合,拟合结果如图 3 所示,拟合参数见表 3。

表 3 滑带土动模量衰减模型参数

Table 3 Parameters of dynamic elastic modulus deterioration model				
$w/\%$	A	B	C	R^2
11.4	18.241	0.128	10.705	0.990
15.6	17.931	0.142	9.279	0.995
18.6	10.330	0.109	6.726	0.995

由表 3 可知,各拟合曲线的相关系数均比较高,说明式(1)构建的动模量衰减模型对泄流坡滑带土是适用的。此外,不同含水率对应的拟合参数 B 值比较接近,进一步说明了滑带土动弹性模量衰减曲线的形态受含水率的影响很小。

由于动三轴仪本身的局限性,试验中能测得的最小动应变约为 0.01%,以式(1)构建的动弹性模量衰减模型为基础,定义 $\epsilon_d=0.01\%$ 对应的 E_d 为最大动弹性模量 E_{dmax} ,绘制 E_{dmax} 随含水率变化曲线(图 4)。

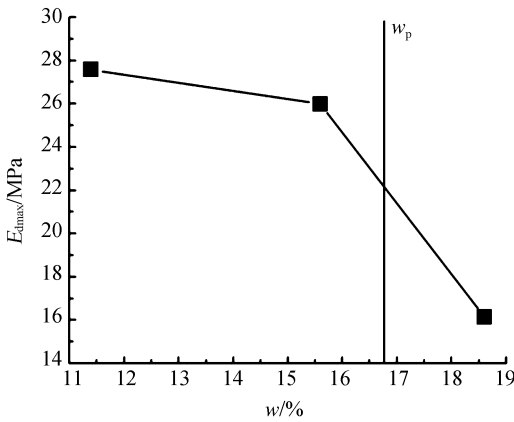


图 4 最大动弹性模量-含水率关系
Fig.4 Relationship between E_{dmax} and w

由图 4 可知,滑带土最大动弹性模量 E_{dmax} 随着含水率的增大而不断减小,含水率低于塑限时 E_{dmax} 衰减较慢,含水率高于塑限, E_{dmax} 衰减速率急剧增大,体现了泄流坡滑带土的动力特性受含水率的影响显著,在滑带土塑限附近存在水敏感性转折点。

2.2 动弹性模量衰减曲线归一化特征

栾茂田等^[14]利用三轴扭剪仪研究了海底原状粉土的动力特性,试验结果表明不同固结围压下动剪切模量和动剪应变关系曲线具有归一化特征;与之类似,Santos J A 等^[15]通过引入参考剪应变验证了不同塑性指数和平均固结压力下各类土体的剪切模量衰减曲线也具有归一化特征。依据上文中定义的 E_{dmax} 绘制归一化动弹性模量 E_d/E_{dmax} 与动应变 ϵ_d 间相关关系(图 5)。

如图 5 所示,所有试验数据点均落在较窄的区间内,由此可知,不同含水率下泄流坡滑带土动弹性模量与动应变间相关关系也具有归一化特征。为了定量描述这种归一化相关关系,利用 Matasovic^[16]提出的归一化模型[式(2)]对试验数据进行曲线拟合,拟合结果一并列于图 5 中。由良好的拟合效果可知,该归一化模型也同样适用于泄流坡滑带土。

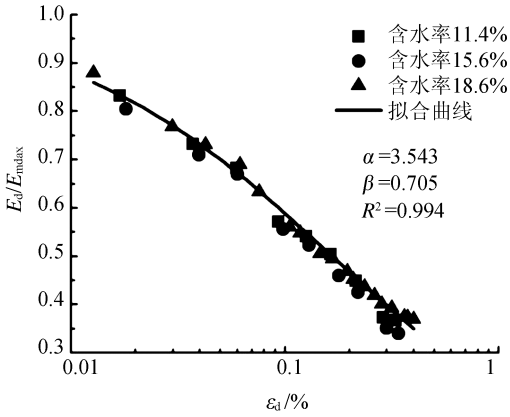


图 5 归一化动弹性模量与动应变之间关系
Fig.5 Normalized relationship between E_d/E_{dmax} and ϵ_d

$$E_d/E_{dmax} = \frac{1}{1 + \alpha (\epsilon_d)^\beta} \quad (2)$$

式中： α 和 β 均为模型拟合参数。

2.3 滑带土阻尼比

阻尼比代表了土样在动荷载作用下的耗能能力,为了比较不同含水率下滑带土阻尼比的大小,绘制阻尼比 λ - 动应变 ϵ_d 关系曲线(图 6)。

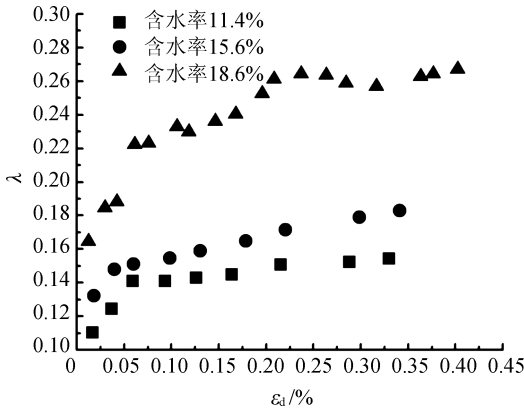


图 6 阻尼比-动应变关系曲线
Fig.6 Relationship between λ and ϵ_d

由图 6 可知,相同含水率下滑带土的阻尼比 λ 有随动应变的增大而增大的趋势。在动应变较小时阻尼比增长较快,随着动应变的增大,阻尼比增长速率变慢,并表现出趋于稳定的态势。相同动应变下,滑带土的阻尼比随着含水率的增大而增大,且增长速率有随着含水率的增大而不断增大的趋势。

依据以试验得到的不同含水率下最大阻尼比 λ_{max} 为基准,对阻尼比和动应变关系曲线进行归一化处理。归一化阻尼比 λ/λ_{max} 与动应变 ϵ_d 之间的相关关系如图 7 所示。

由图 7 可知,不同含水率下泄流坡滑带土的阻

尼比与动应变间相关关系也具有一定的归一化特征。根据归一化阻尼比 λ/λ_{max} 随动应变的变化趋势,可以利用指数函数[式(3)]定量描述二者间相关关系,拟合结果一并列于图 7 中。

$$\lambda/\lambda_{max} = A - B * C^{\epsilon_d} \quad (3)$$

式中： A 、 B 和 C 均为拟合参数。

3 滑带土动力本构模型

土体的动应力-动应变关系是表征土动力性质的基本关系,也是分析土体动力失稳过程等一系列特性的依据。骨架曲线表明了某级动力加载下最大动应力与最大动应变之间的相互关系。本次试验得到的滑带土动应力-应变骨干曲线如图 8 所示。

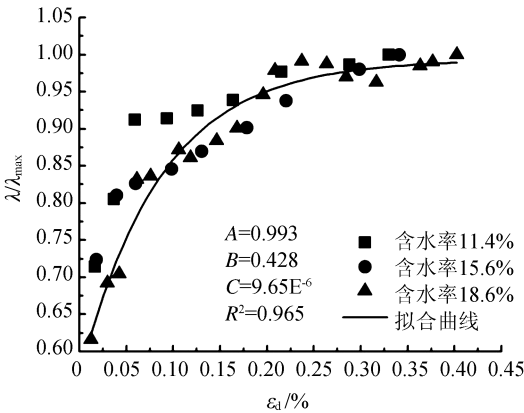


图 7 归一化阻尼比与动应变之间关系
Fig.7 Normalized relationship between λ/λ_{max} and ϵ_d

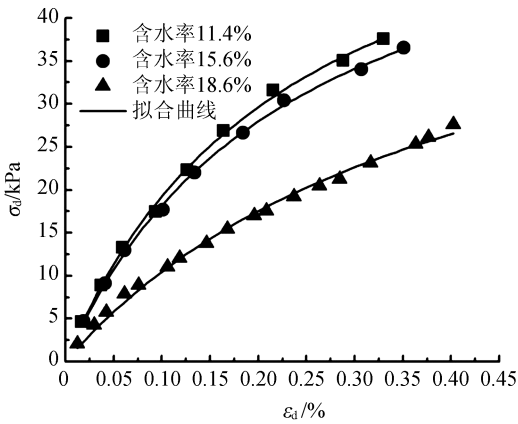


图 8 不同含水率下动应力-动应变骨干曲线
Fig.8 Constitutive relationships of $\sigma_d-\epsilon_d$ under different water contents

由图 8 可知,滑带土动应力-动应变关系具有明显的非线性特征,随着动应变的不断增大,曲线的非线性特征越发显著。

双曲线(Hardin-Drnevich)模型是描述土在循环荷载作用下非线性动应力-应变关系的本构模型。该模型可以模拟骨干曲线的应变硬化特征,具有概念明确,应用方便的优点,广泛应用于土动力特性研究领域^[17-18]。

该模型的基本形式为:

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{a + b \times \epsilon_d} \tag{4}$$

式中: a 和 b 为模型拟合参数,物理意义分别为初始动弹性模量的倒数和极限动应力的倒数。

利用双曲线模型对泄流坡滑带土的动应力-应变关系进行曲线拟合,拟合结果如图 8 所示,拟合参数列于表 4 中。

表 4 双曲线模型拟合参数

Table 4 Parameters of Hypobolic Model

土样编号	含水率 $w/\%$	a	b	R^2
X1	11.4	0.003 65	0.015 53	0.998
X2	15.6	0.003 85	0.016 52	0.999
X3	18.6	0.007 73	0.018 46	0.995

由图 8 和表 4 的拟合结果可知,在较小的应变范围内,双曲线模型也同样可以用来描述泄流坡滑坡滑带土的动应力-应变本构关系。

4 结论

本文通过循环动三轴试验对不同含水率下泄流坡滑带土的动力特性进行研究,得出如下结论:

- (1) 泄流坡滑坡滑带土动弹性模量随动应变的增加呈指数形式衰减,含水率并不影响动弹性模量-动应变关系曲线的形态,但对动弹性模量的大小影响显著,不同含水率下滑带土动弹性模量-动应变相关关系具有归一化特征。
- (2) 泄流坡滑坡滑带土的阻尼比随动应变的增大而增大,随含水量的增大而增大,不同含水率下滑带土阻尼比-动应变相关关系也具有归一化特征。
- (3) 不同含水率下滑带土动应力-应变骨干曲线均表现出明显的非线性,双曲线模型能够较好地描述泄流坡滑坡滑带土的动力本构关系。

影响土体动力特性指标的因素很多,本文仅考虑了含水率的影响,今后还应进行进一步的加深研究,以期获得更全面的研究成果。

致谢:本次研究得到了兰州理工大学袁中夏副教授和中国地震局兰州地震研究所刘红玫高工的指导和帮助,谨此表示感谢。

参考文献(References)

[1] 刘传正,苗天宝,陈红旗,等.甘肃舟曲 2010 年 8 月 8 日特大山洪泥石流灾害的基本特征及成因[J].地质通报,2011,30(1):141-150.
LIU Chuan-zheng, MIAO Tian-bao, CHEN Hong-qi, et al. Basic Feature and Origin of the 8 · 8 Mountain Torrent-debris Flow Disaster Happened in Zhouqu County, Gansu, China, Aug.8, 2010[J].Geological Bulletin of China, 2011, 30(1): 141-150. (in Chinese)

[2] 邢爱国,吴志坚,陈龙珠,等.汶川地震在甘肃省的次生典型边坡灾害特征[J].西北地震学报,2010,32(1):95-98.
XIANG Ai-guo, WU Zhi-jian, CHEN Long-zhu, et al. Characteristics of Secondary Typical Slope Disaster in Gansu Province Induced by the Wenchuan Earthquake[J].Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(1): 95-98. (in Chinese)

[3] 畅益锋,李仁华.白龙江泄流坡滑坡变形特征及成因分析[J].中国地质灾害与防治学报,1999,3(1):93-95.
CHANG Yi-feng, LI Ren-hua. Analysis of Deformation and Causes of Xieliupo Landslide[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 3(1): 93-95. (in Chinese)

[4] 吴玮江,王念秦.甘肃滑坡灾害[M].兰州:兰州大学出版社,2006:81,178.
WU Wei-jiang, WANG Nian-qin. Landslide Disasters of Gansu [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006: 81, 178. (in Chinese)

[5] 蒋秀姿,文宝萍.缓慢复活型滑坡滑带土的蠕变性质与特征强度试验研究[J].岩土力学,2015,36(2):495-501,549.
JIANG Xiu-zi, WEN Bao-ping. Creep Behavior of Slip Zone of Reactivated Slow-moving Landslide and Its Characteristic Strength[J].Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 495-501, 549. (in Chinese)

[6] 宋丙辉,谌文武,吴玮江,等.甘肃舟曲泄流坡滑坡滑带土的抗剪强度特性[J].兰州大学学报:自然科学版,2011,47(6):7-12.
SONG Bing-hui, CHEN Wen-wu, WU Wei-jiang, et al. Shear Strength Characteristics of Soil in the Slide Zone of Xieliupo Landslide in Zhouqu, Gansu Province[J].Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2011, 47(6): 7-12. (in Chinese)

[7] 晏鄂川,刘汉超,唐辉明.滑带土动力学性质试验研究[J].工程地质学报,2003,11(3):318-322.
YAN E-chuan, LIU Han-chao, TANG Hui-ming. Experimental Study of the Dynamic Properties of Soil in Slide Zone of Landslide[J].Journal of Engineering Geology, 2003, 11(3): 318-322. (in Chinese)

[8] 杨喆.机车振动作用下黄土滑坡滑带土的动力特性及其稳定性研究[D].西安:西北大学,2008.
YANG Zhe. Study on Dynamic Characteristics of Slide-zone Soil and Stability of Loess Landslides under Train Vibration Load[D].Xi'an: Northwest University, 2008. (in Chinese)

[9] 蒋树,文宝萍,赵成,等.甘肃舟曲泄流坡滑坡活动机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(3):1-7.

QU Hong-lue,ZHANG Jian-jing.Shaking Table Tests on Influence of Site Conditions on Seismic Earth Pressures of Retaining Wall[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(7):1227-1233.(in Chinese)

[18] 张建经,韩鹏飞.重力式挡墙基于位移的抗震设计方法研究——大型振动台模型试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(3):416-423.

ZHANG Jian-jing,HAN Peng-fei.Displacement-based Seismic Design Method for Gravity Retaining Walls——Large Scale Shaking Table Tests[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(3):416-423.(in Chinese)

[19] 陈育民.FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2013:221-224.

CHEN Yu-min.FLAC/FLAC3D Foundation and Engineering Example[M].Beijing:China Water & Power Press,2013:221-224.(in Chinese)

[20] 黄润秋,李果,巨能攀.层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):865-875.

HUANG Run-qiu,LI Guo,JU Neng-pan.Shaking Table Test on Strong Earthquake Response of Stratified Rock Slopes[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(5):865-875.(in Chinese)

(上接 749 页)

JIANG Shu,WEN Bao-ping,ZHAO Chen,et al.Analysis of the Mechanics of Movement of Xieliupo Landslide in Zhouqu, Gansu[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2013,24(3):1-7.(in Chinese)

[10] 黄晓,杨为民,张春山,等.舟曲泄流坡滑坡变形特征及其形成机理[J].地质力学学报,2013,19(2):178-187.

HUANG Xiao,YANG Wei-min,ZHANG Chun-shan,et al. Deformation Characteristics and Growth Mechanics of Xieliupo Landslide in Zhouqu[J].Journal of Geomechanics,2013,19(2):178-187.(in Chinese)

[11] 黄斌,傅旭东,谭凡,等.含水率对滑带土强度及变形影响试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2613-2618.

HUANG Bin,FU Xu-dong,TAN Fan,et al. Experimental Study of Relationship between Water Content and Strength or Deformation of Slip Soil[J].Rock and Soil Mechanics,2012, 33(9):2613-2618.(in Chinese)

[12] 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.Experimentalresearch on Dynamic Characteristics of Roadbed Compaction Loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28 (5):1037-1046.(in Chinese)

[13] 周健,白冰,徐建平.土动力学理论与计算[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.

ZHOU Jian,BAI Bing,XU Jian-ping.Theory and Calculation of Soil Dynamics[M].Beijing:China Architecture and Building Press,2001.(in Chinese)

[14] 栾茂田,何杨,许成顺,等.黄河三角洲粉土循环剪切特性的试验研究[J].岩土力学,2008,29(12):3211-3216.

LUAN Mao-tian,HE Yang,XU Cheng-shun,et al. Experimental Study of Cyclic Shear Behaviour of Silty Soils in Yellow River Delta[J].Rock and Soil Mechanics,2008,29 (12):3211-3216.(in Chinese)

[15] Santos J A,Correia A G.Shear Modulus of Soils under Cyclic Loading at Small and Medium Strain Level.12WCEE,2000.

[16] Matasovic N.Seismic Response of Composite Horizontally-layered Soil Deposits[D].Los Angeles:Department of Civil Engineering,University of Colifornia at Los Angeles,1993.

[17] 王兰民.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003:23-24.

WANG Lan-min.Loess Dynamics[M].Beijing:Seismological-Press,2003:23-24.(in Chinese)

[18] 吴世明.土动力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2000:75-88.

WU Shi-ming.Soil Dynamics[M].Beijing:China Architecture and Building Press,2000:75-88.(in Chinese)