

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.03.006

残坡积土动力特性的试验研究

董金玉, 杨兴隆

(华北水利水电大学 岩土工程与水工结构研究院, 河南 郑州 450046)

摘要: 利用动单剪仪研究某地震滑坡地区残坡积土的动力强度特性, 针对残坡积土进行了不同固结压力、不同干密度、不同振动频率下的动单剪试验。结果表明: 在振动荷载作用下, 饱和和非饱和残坡积土动剪应力-动剪应变关系呈双曲线型, 动荷载频率越大、震动持续时间越长、产生的动应变越大; 动剪切模量随动剪应变的增加而减小, 阻尼比随着动剪应变的增加而增大; 固结围压、干密度和振动频率对残坡积土的最大动剪切模量有显著影响; 非饱和残坡积土的动剪模量和最大动剪模量较饱和土大, 阻尼比较饱和土小。试验结果为该地震滑坡地区稳定性评价提供了相关参数, 为动力作用下残坡积土变形机制和动本构模型的分析提供了必要的理论基础。

关键词: 残坡积土; 动力特性; 动剪应力; 阻尼比; 动剪应变

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)03-0038-05

Experimental Study on the Dynamic Properties of the Residual Soil

DONG Jinyu, YANG Xinglong

(Research Institute of Geotechnical Engineering and Hydraulic Structure,

North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450046, China)

Abstract: By using dynamic simple shear tests apparatus, the dynamic properties of the residual soil in an earthquake landslide area are analyzed through a series of dynamic simple shear tests for the different consolidation pressure, the different dry density, and the different vibration frequency dynamic. Experimental results show that under the vibration load the relationship of the dynamic shear stress and the dynamic shear strain is hyperbolic curve instead of linear. When the specimen subjected the same dynamic stress, the larger dynamic deformation is corresponding with higher frequency and the longer duration of shaking. Dynamic shear modulus decreases with the increase of dynamic shear strain and damping ratio increases with the increase of dynamic shear strain. Consolidation confining pressure, dry density and vibration frequency has significant influence on maximum dynamic shear modulus of the residual soil. the dynamic shear modulus and the maximum dynamic shear modulus of unsaturated residual soil is higher than saturated residual soil, while the damping ratio is smaller. This result could provide relevant parameters for stability evaluation in earthquake landslide area, and offer the necessary basis for the analysis of the loading deformation mechanism and the dynamic constitutive model of the residual under the dynamic pressure.

Keywords: residual soil; dynamic properties; dynamic shear stress; damping ratio; dynamic shear strain

残坡积土是经物理风化和化学风化后, 残留在原地未经搬运的土, 其分布十分广泛, 具有质地不均匀、孔隙比大、结构性差、遇水软化、受扰动后强度降幅大的特点^[1-2], 在地震和循环动力荷载作用下残

坡积土强度降低, 稳定性变差, 较易发生崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害。加上残坡积土工程地质性能的区域差异性, 因此对某地残坡积土力学特性的研究具有重要意义。

收稿日期: 2021-01-05

修稿日期: 2020-02-08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1509704); 国家自然科学基金重点项目(U1704243); 国家自然科学基金项目(41102203)

作者简介: 董金玉(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土体动力特性方面的研究工作。E-mail: dongjy0552@126.com

在土的动力特性研究方面,众多学者进行了大量的研究,取得一些有益的成果^[3-16]。田竟等^[3]分析了不同强度影响因素的动荷载作用下黄河冲积粉土的动应力-动应变发展规律;丁志宇等^[4]分析了细粒含量对饱和粉土动力特性的影响规律;尚守平等^[5]对动荷载作用下土阻尼比进行了试验对比研究;褚峰等^[6]进行了饱和淤泥质砂土动力变形及动强度特性试验研究;毛成等^[7]对膨胀土的动力特性进行探讨。在残坡积土的研究方面,谭捍华等^[1]对千枚岩残坡积土进行了大型直剪试验研究,肖治宇等^[17]进行了非饱和残坡积土强度随含水率变化的试验研究,杨矫等^[18]对降雨入渗下残坡积土边坡的稳定性进行模拟研究。李焱等^[19]进行了不同振动频率下非饱和黄土的动力特性研究;张禾等^[20]进行了土的动力参数测试技术及试验成果分析;潘越^[21]进行了循环荷载作用下土工合成材料加筋土动力特性研究;严红^[22]进行了高速铁路路基粉质黏土填料物理学特性试验研究;杨同帅^[23]进行了上海软黏土小应变力学特性试验及本构模拟;郑瑞华等^[24]进行了苗家坝面板堆石坝材料动力特性试验研究。然而,虽然对土动力特性的研究较为成熟,但对残坡积土的研究大部分是在静力作用下对其强度和稳定性的研究,对用残坡积土的动力特性的研究却鲜少见到。

本文以某典型地震滑坡区残坡积土为研究对象,采用相对动三轴试验成本低,工序简单的动单剪试验仪,对饱和和非饱和残坡积土进行了不同固结压力,不同干密度,不同振动频率下的动单剪试验动力特性进行研究。

1 试验设备及试验方案

1.1 试验概况

试验所用土为某典型地震滑坡现场所取的残坡积土。试验所用仪器为 Shear Trac-II 动单剪仪,该仪器能完成动强度、主要动力学参数的测定工作,试验过程中可对土样施加动荷载并实时监控整个试验过程,得到土样振动过程中的动剪应力,动剪应变曲线。试样尺寸为:直径 63.5 mm × 25.4 mm(高度)。

1.2 试验方案

在不同固结压力 $\sigma_v = 100$ kPa、200 kPa、300 kPa;不同干密度 $\rho_d = 1.50$ g/cm³、1.60 g/cm³、1.70 g/cm³;不同振动频率 $f = 0.2$ Hz、0.5 Hz、1.0 Hz 下对饱和、非饱和残坡积土进行动单剪试验,试样共

14 组(制备过程从略)。

2 试验结果分析

2.1 残坡积土动剪应力 τ_d - 动剪应变 γ_d 关系

由图 1、图 2 可以看出,在周期性荷载作用下,随着动应力的增加,动应变随之增大,表现出明显的阶段性和非线性特征。在 γ_d 小于 1% 时,即在加载的初始阶段 $\tau_d - \gamma_d$ 关系曲线的斜率较大,而当 γ_d 大于 1% 的阶段, $\tau_d - \gamma_d$ 关系曲线的斜率逐渐减小。随着固结围压、干密度的增大, $\tau_d - \gamma_d$ 曲线向上移动,当动剪应力不变时,随着固结应力、干密度增加,动剪应变减小。这是由于固结应力越大,干密度越大,试样的刚度越大,抵抗变形的能力越强。

对比图 1、图 2 可知,在相同的固结压力、干密度、振动频率下,非饱和残坡积土的临界动剪应力大于饱和残坡积土的临界动剪应力;而在 γ_d 较小时,非饱和土的 $\tau_d - \gamma_d$ 曲线斜率明显大于饱和土。这是由于非饱和土中基质吸力的存在,增强了残坡积土的黏聚力,提高了土体的抗变形能力,使土粒间发生错动的难度增大。因此残坡积土的非饱和状态对 $\tau_d - \gamma_d$ 关系曲线影响明显。

2.2 残坡积土动剪切模量 G_d - 动剪应变 γ_d 的关系

土的动剪模量 G_d 可以由动单剪试验得到的动剪应力 - 应变本构关系曲线得到,即:

$$G_d = \tau_d / \gamma_d = 1 / (a + b\gamma_d) \quad (1)$$

$$\text{可变形为} \quad 1/G_d = a + b\gamma_d \quad (2)$$

$$1/\tau_d = a/\gamma_d + b \quad (3)$$

式中: G_d 为动剪切模量; τ_d 为动剪应力; γ_d 为动剪应变; a 、 b 为系数。

$1/G_d - \gamma_d$ 关系曲线如图 3、图 4 所示。由图 3、图 4 可以看出:

(1) 在净围压、干密度和振动频率分别相同的情况下,非饱和残坡积土和饱和残坡积土的动剪切模量都随动应变的增大迅速减小后基本不变。这也反映了土体的振动剪切过程开始,土体结构迅速发生变化,整体刚度减小,在剪应变发展的后期,较小的剪应力就可使土体产生很大的应变变形,即土体在受到振动剪切破坏以后,本身即不能再承受力的作用。

(2) 饱和土试样的动剪切模量较非饱和土的略小。这与非饱和土的力学性质有关,用平均骨架应力给出解释,土的强度和刚度取决于平均骨架应力,平均骨架应力为净围压应力和饱和度与基质吸力的

乘积之和即:

$$\sigma' = \sigma_n + S_r s \quad (4)$$

式中: σ' 为平均骨架应力; σ_n 为净围压应力; S_r 为饱和度; s 为基质吸力。

在饱和土样中,由于基质吸力为 0,因此在其他条件相同的情况下,在振动破坏过程中饱和土平均骨架应力(有效应力)始终比非饱和土的平均骨架应力值略小。

(3) 动剪切模量与动应变关系曲线呈阶段性的变化特征,在加载初期动应变幅值较小的情况下,随着动应变的增加,动剪切模量迅速减小;在应变幅值较大的情况下,动剪切模量随着应变的增加缓慢下

降。在相同的动剪应变条件下,动剪切模量随振动频率的增大呈递增趋势,而剪应变越大,不同振动频率下的动剪切模量之间的差值越来越小,动剪切模量最终趋向较小的稳定值。干密度和竖向压力对动剪切模量的影响与振动频率的影响大致相同。

试验结果表明,动剪应力-剪应变关系呈双曲线型^[8],残坡积土的这一特征可由 $1/G_d \sim \gamma_d$ 关系曲线的线性相关性反映出来(见图 3、图 4)。由图 3、图 4 可以看出 $1/G_d \sim \gamma_d$ 拟合曲线近似为线性,这能更直观的看出干密度、竖向压力和振动频率对动剪切模量的影响。

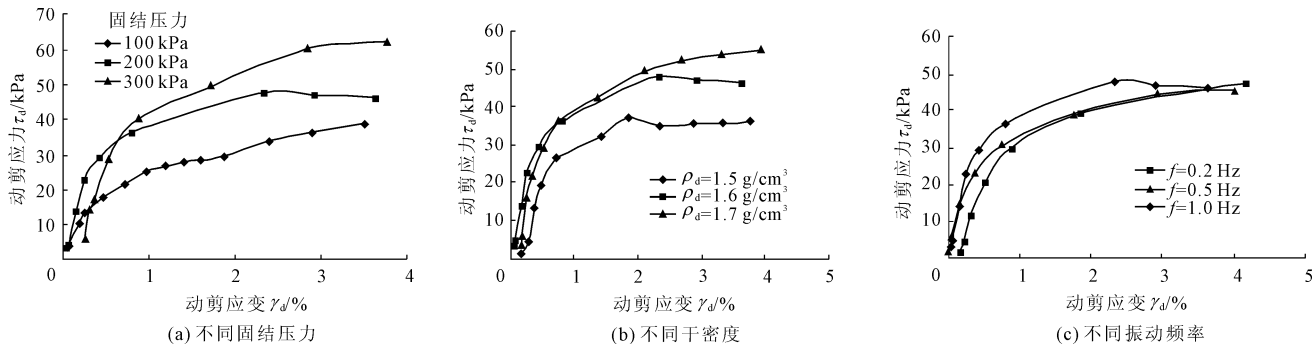


图 1 非饱和残坡积土的动剪应力 τ_d - 动剪应变 γ_d 关系曲线

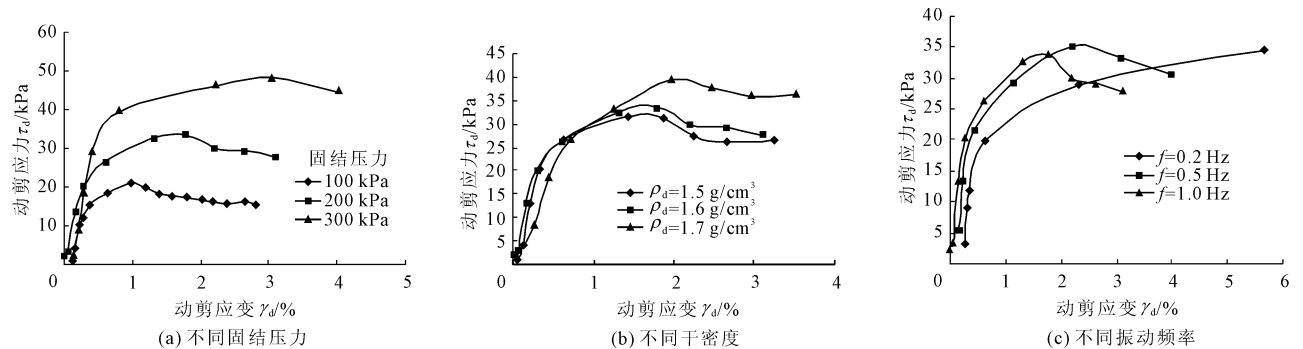


图 2 饱和残坡积土的动剪应力 τ_d - 动剪应变 γ_d 关系曲线

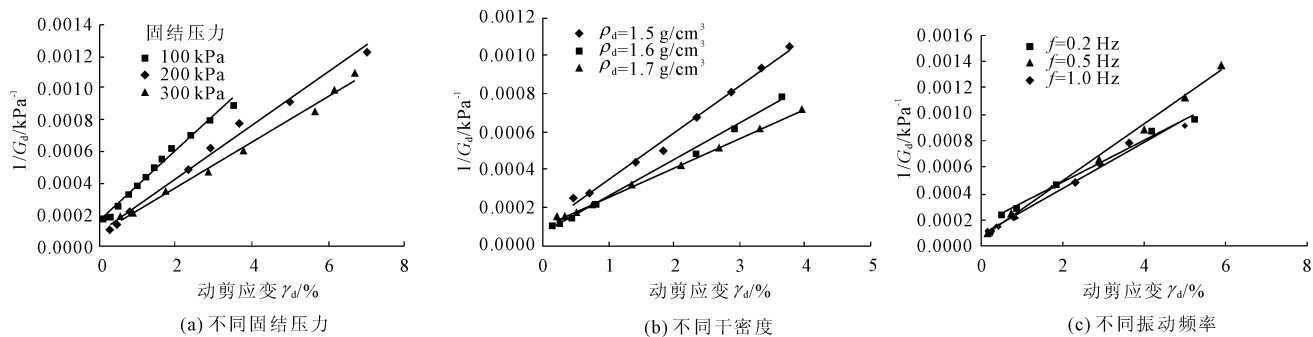


图 3 非饱和残坡积土的 $1/G_d - \gamma_d$ 关系曲线

2.3 最大动剪切模量 $G_{d\max}$ 的影响因素分析

动荷载作用下的 $G_{d\max}$ 定义为动剪应力 ~ 应变

关系曲线上,应变 $\gamma_d \rightarrow 0$ 时的动剪切模量。由动单剪试验得到的 $\tau_d - \gamma_d$ 曲线近似双曲线函数,经过变

换后成为线性函数式(2)(如图3、图4所示),用直线拟合后延长,在 $\gamma_d = 0$ 处截取的纵坐标 a 的倒数即为最大动剪切模量 G_{dmax} ,即:

$$G_{dmax} = 1/a \quad (5)$$

图5给出了最大动剪切模量 G_{dmax} 影响因素分析图。图5可以更直观的看出,在振动频率、干密度相同的情况下,固结压力的大小对土体的最大动剪切模量有明显影响,固结的压力越大,其最大动剪模

量越大,因为在其他条件相同的情况下,固结压力越大,土体颗粒的固结效果也就越好,颗粒联结强度越高,在受到相同的动剪应力时产生的动剪应变较小,其动剪切模量越大;对于干密度为 1.6 g/cm^3 的残坡积土,在固结压力较小时,固结压力的增大对试样最大动剪切模量的增加影响显著,在固结压力较大时,增大固结压力对试样最大动剪切模量的变化影响不大。

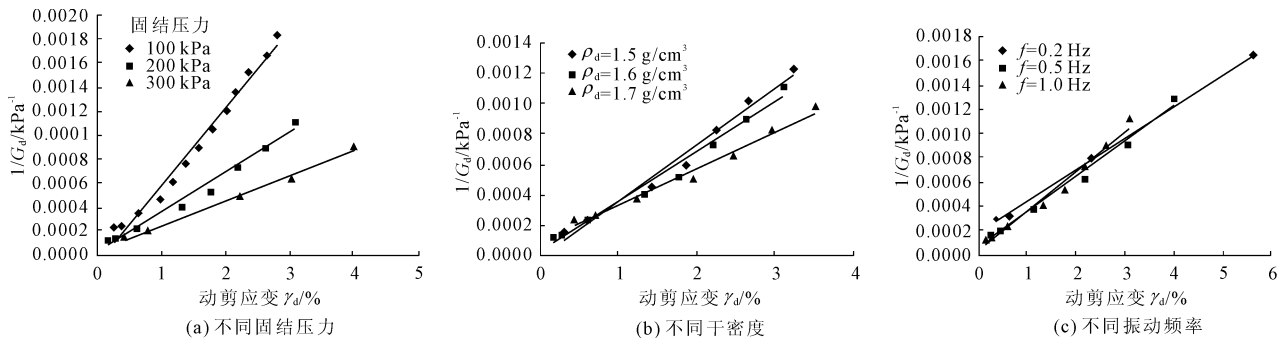


图4 饱和和残坡积土的 $1/G_d - \gamma_d$ 关系曲线

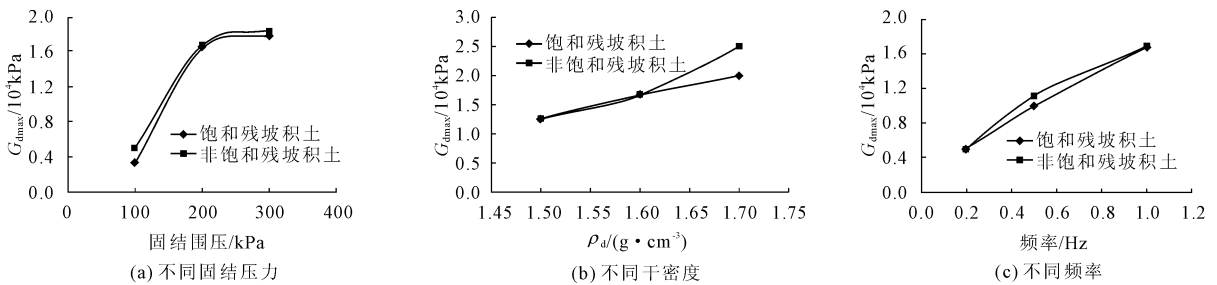


图5 最大动剪切模量 G_{dmax} 的影响因素分析

在振动频率和固结压力相同的情况下,土体干密度对其最大动剪切模量也有明显影响,即随着土样干密度的增大,其最大动剪切模量也随之增大,且几乎呈线性增长趋势。

在干密度和固结压力相同的情况下,振动频率对土体的最大动剪切模量也有明显影响,土体在较高频率下的剪切破坏时,一方面其结构来不及破坏,结构强度可以抵抗一部分剪切力的破坏作用,故其剪切强度较高、动剪切模量较大;另一方面,在较高频率作用时,土体中的孔隙水不能及时排出,而此时全部剪应力由总应力承担,抗剪强度 τ_d 较高,在受到同样大小的剪切力时,其变形相对较小,因此最大动剪切模量较大。随着振动频率的增加,土体的最大动剪切模量增大。

饱和土试样的最大动剪切模量较非饱和土的略小。这与前面所述原因一致。最大动剪切模量出现在振动破坏的初期,此时非饱和土的强度和刚度均

大于饱和土。

2.4 阻尼比 λ 与动应变 γ_d 的关系

在动荷载作用下,用于衡量土所吸收能量大小的特征值既是土的阻尼比,反映土在循环荷载中的能量耗散。依据动力单剪试验实测记录的动剪应力-应变时程线,进而绘制某一级动荷载循环内的动剪应力 τ_d 与动剪应变 γ_d 曲线,可得到一个滞回环(如图6所示)。

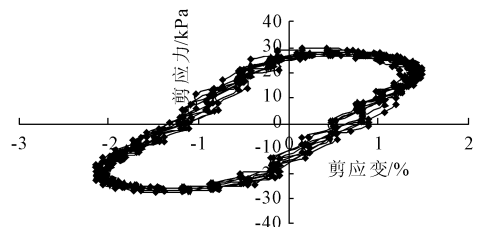


图6 滞回环

图7为阻尼比与水平剪应变的关系。由图7可知:非饱和及饱和土试样阻尼比 λ 随动剪应变的增

大呈递增趋势;当水平剪应变大于 2% 后,阻尼比 λ 的变幅越来越小,最终趋于某一稳定值,即 λ_{\max} 。在同一应变条件下,饱和土试样的阻尼比则比非饱和残坡积土略大。

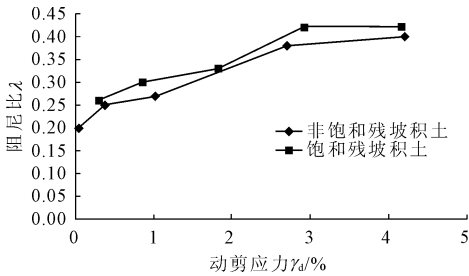


图 7 阻尼比与动剪应变关系

3 结论

(1) 在不同固结压力、不同干密度、不同振动频率下,在周期性荷载作用下,随着动应力的增加,动应变随之增大,动剪应力 - 剪应变关系呈双曲线型。

(2) 动剪切模量随动剪应变的增加而减小。动剪切模量与动应变关系曲线呈阶段性的变化特征,在加载初期动应变幅值较小的情况下,随着动应变的增加,动剪切模量迅速减小;在应变幅值较大的情况下,动剪切模量随着应变的增加缓慢下降。

(3) 动剪切模量的倒数与动应变幅值呈线性关系。

(4) 在振动频率、干密度相同条件下,固结压力的大小对土体的最大动剪切模量有明显影响,随着固结压力、振动频率、干密度的增大,残坡积土最大动剪切模量增大。

(5) 阻尼比随着动剪应变的增加而增大。

(6) 非饱和残坡积土的动剪模量和最大动剪模量较饱和土大,阻尼比较饱和土小。

参考文献:

[1] 谭捍华,孟庆山. 千枚岩残坡积土大型直剪试验研究[J]. 岩土力学,2011(S1):360-363.

[2] 房恩泽. 堆石料的模量阻尼试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(2):173-176.

[3] 田 竟,杜春雪,王江锋,等. 动荷载作用下饱和和粉土动力特性研究[J]. 人民黄河,2018,40(8):141-144,668.

[4] 丁志宇,丰土根,周 健,等. 细粒含量对饱和粉土动力特性影响试验研究[J]. 人民黄河,2013,35(3):138-140.

[5] 尚守平,卢华喜,任 慧,等. 动荷载作用下土阻尼比的试验对比研究[J]. 地震工程与工程震动,2006,26(2):161-165.

[6] 褚 峰,邵生俊,陈存礼. 饱和淤泥质砂土动力变形及动强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(s1):3299-3305.

[7] 毛 成,邱延峻. 膨胀土与改性膨胀土的动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(10):1783-1788.

[8] 张齐齐. 延安新区改良残坡积黄土试验特性及其路基沉降变形研究[D]. 西安:西北大学,2015.

[9] 王桂萱,张虎韦,赵 杰. 滨海淤泥固化土的动模量与阻尼比特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):51-55.

[10] 张向东,曹启坤,潘 宇. 二灰改良土动力特性试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(8):2560-2564.

[11] 白 颢,孔令伟. 固结比对石灰土动力特性的影响试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(6):1590-1594.

[12] 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.

[13] 张向东,冯胜洋,王长江. 辽西风积土动力特性实验研究[J]. 实验力学,2012,27(2):165 - 170.

[14] 陈存礼,何军芳,胡再强,等. 尾矿砂的动力变形及动强度特性研究[J]. 水利学报,2007,38(3):365-370.

[15] 谢定义. 土动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2011:148.

[16] 袁晓铭,孙 锐,孙 静,等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程震动,2000,20(4):133-139.

[17] 肖治宇,陈昌富,杨剑祥. 非饱和残坡积土强度随含水量变化试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2011,37(10):20-24.

[18] 杨 娇,王 宇,雷富宏,等. 降雨入渗下残坡积土边坡的稳定性模拟研究[J]. 安全与环境工程,2012,19(3):5-10.

[19] 李 焱. 不同振动频率下非饱和黄土的动力特性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.

[20] 张 禾,姚 坤,刘鲁娜. 土的动力参数测试技术及试验成果分析[J]. 岩土工程界,2008(7):57-59.

[21] 潘 越. 循环荷载作用下土工合成材料加筋土动力特性研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2013.

[22] 严 红. 高速铁路路基粉质黏土填料物理力学特性试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.

[23] 杨同帅. 上海软黏土小应变力学特性试验及本构模拟[D]. 上海:上海交通大学,2019.

[24] 郑瑞华,程 嵩,张建民,等. 苗家坝面板堆石坝材料动力特性试验研究[J]. 世界地震工程,2010,26(S1):357-360.