

车高凤,钟秀梅,马金莲,等.不同加载方式下黄土累积变形特征研究[J].地震工程学报,2021,43(5):1208-1213.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.05.1208

CHE Gaofeng, ZHONG Xiumei, MA Jinlian, et al. Accumulative deformation characteristics of loess under different loading modes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(5): 1208-1213. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.05.1208

不同加载方式下黄土累积变形特征研究

车高凤^{1,2,3}, 钟秀梅^{1,3}, 马金莲^{1,3}, 柴少峰^{1,3}, 王 平^{1,3}

(1. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 河北 廊坊 065201;

3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 土体动力特性主要与其受力状态、土体加载类型、试验控制方式以及荷载等参数有关。以往非饱和黄土累积变形试验研究通过单向动应力加载方式开展相关研究,并不能真实反映土体受力状态。现运用 WF-12440 型动三轴-空心圆柱扭剪试验系统,通过单向荷载和双向荷载两种不同的动应力加载方式,进行黄土的长期重复载荷试验,对比不同动应力加载方式对非饱和黄土累积变形发展特征的影响。试验结果发现:黄土在单向荷载或双向荷载作用下,其软化指数均随着循环次数的增加,呈非线性减小的趋势,在相同循环振次时,土体软化指数随着动应力幅值的增大而减小;黄土在不同加载方式作用下,软化指数减小速率在循环振次 100 次以内较快,后期随振次增加,土体软化速率逐渐趋于平稳;黄土在双向荷载作用下,当轴向动荷载较小时,径向荷载的施加,将加速黄土的软化程度,随着轴向动荷载的增大,径向荷载对黄土软化的影响逐渐减弱,其对于黄土变形的影响存在一临界轴向循环动应力。本研究的开展,可更准确地进行不同荷载耦合变化下,黄土场地震陷评估或路基土体变形计算,实现有效控制路基的整体稳定和工后沉降量,以期根据路基土参数预测后期沉降,极具重要的科研和工程意义。

关键词: 黄土; 循环三轴试验; 轴向动荷载; 径向动荷载; 软化指数

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)05-1208-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.05.1208

Accumulative deformation characteristics of loess under different loading modes

CHE Gaofeng^{1,2,3}, ZHONG Xiumei^{1,3}, MA Jinlian^{1,3}, CHAI Shaofeng^{1,3}, WANG Ping^{1,3}

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of CEA & Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Langfang 065201, Hebei, China;

3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The dynamic characteristics of soil are mainly related to the stress condition, loading

收稿日期: 2021-06-21

基金项目: 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室开放基金(FZ213204); 中国地震局黄土地震工程重点实验室开放基金(KLLEE-17-001); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2018IESLZ08); 中国地震局地震科技星火计划(XH20058Y); 甘肃省科技计划项目(18YF1FA101); 国家自然科学基金(U1939209, 51778590, 51578518)

第一作者简介: 车高凤(1987—), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事岩土地震工程等方面的试验研究。E-mail: 414261490@qq.com。

通信作者: 王 平(1976—), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事土动力学与黄土地震工程研究。E-mail: lanzhouwang_p@126.com。

type, test control mode, load, and other parameters. Previous experimental study on the cumulative deformation of unsaturated loess under uniaxial dynamic stress loading can not truly reflect the stress state of soil. In this study, the WF-12440 dynamic triaxial-hollow cylinder torsional shear test system produced by WF Company, UK, was used to carry out a series of long-term repeated load tests of loess under unidirectional and bidirectional dynamic stress loads. The effects of different dynamic stress loading methods on the development characteristics of cumulative deformation of unsaturated loess. The test results showed that the softening index of loess decreases non-linearly with the increase of cycle times both under unidirectional and bidirectional loading. At the same cycle times, the softening index decreases with the increase of dynamic stress amplitude. Under different loading modes, the softening index decreases rapidly within 100 cycles, and the softening rate tends to be stable with the increase of cycles. Under the action of bidirectional load, when the axial dynamic load is small, the application of radial load will accelerate the softening degree of loess; with the increase of axial dynamic load, the effect of radial load on soil softening will weaken gradually. With the development of this study, it can be more accurate to evaluate the seismic subsidence of loess field or calculate the deformation of subgrade soil under different load coupling changes in Northwest China, so as to effectively control the overall stability of subgrade and the settlement after construction.

Keywords: loess; cyclic triaxial test; axial dynamic load; radial dynamic load; softening index

0 引言

我国已成为世界上高速铁路系统技术最全、集成能力最强、运营里程最长、运行速度最高、在建规模最大的国家,引领着世界高铁发展的新潮流。我国高铁事业发展无疑是巨大的,高速铁路网密集建成,列车时速不断提高,随之振动频率和振幅也大幅增加,路基在高频大振幅作用下将产生更大变形,由此引起地基的振动问题颇多并得到广泛关注。现有交通荷载研究中多以竖向动应力为主,而对于高铁荷载来说,由于列车运行中的蛇形运动、曲线轨道运行以及急刹车等因素,都会造成土体的实际受力状态是双向的,用现有单向循环荷载加载方式代替高铁荷载开展路基土体动力特性研究显然是不安全的。

土体动力特性主要与土体的受力状态、土体加载类型、试验控制方式以及荷载等参数有关。关于土体动力特性的研究,国内外学者^[1-2]开展的研究众多,由于前期仪器设备的局限性,现多采用 Seed^[3]提出的单向循环荷载加载代替双向振动进行室内试验研究模拟土体受力情况,此加载方式及理论研究方法,虽很大程度上简化了土体受力计算,试验操作方法简便可行,但此加载方式并不能真实的反映土体的真实受力状态,随着土体动力特性研究的不断深入,室内试验设备精度及功能进一步更新完善,使得开展双向循环荷载作用下的土体动力特性研究成

为可能。目前针对双向循环荷载作用下土体的动力特性研究甚少,土体应力路径的不同,直接影响其变形发展趋势。蔡袁强等^[4-9]通过双向循环荷载作用下饱和软黏土动力特性试验研究得到影响土体动强度衰减的门槛径向循环应力比;胡秀琴等^[10]发现水平双向荷载作用下,循环剪应力比和相位差在临界循环应力比附近时会加快饱和软黏土总应变和孔压发展;黄珏皓等^[11]研究给出水平双向荷载作用下,饱和软黏土孔压随循环应力比、循环围压的增加而增大,随振动频率增加而减小;黄博等^[12-13]就饱和砂土在较大循环振次作用下单、双向振动方式使试样动力响应产生差异的原因进行了相关研究,周小生等^[14-15]较为系统地研究了重塑膨胀土在单向与双向循环荷载作用下的动强度和变形特性,王敕鹏等^[16]就重塑红黏土进行了双向动荷载下的动变形特性研究,学者针对不同的土体开展了双向循环荷载的动力特性研究,但对于我国西北地区广泛存在的黄土,张希栋等^[17]仅对双向循环荷载耦合下黄土动模量和动剪切变形特性进行了相关研究,现有双向循环荷载作用下非饱和黄土试验研究仅停留在弹性阶段的动强度特性研究方面,然而在双向循环动应力加载方式下,非饱和黄土累积塑性变形发展趋势与轴向荷载作用下的变形趋势是否一致不得而知,因此有必要以双向循环荷载加载方式的循环三轴试验为手段,探讨不同动应力加载方式下的黄土累积变形发展特征。

基于此,本文运用 WF-12440 型动三轴-扭剪试验仪器,通过单向荷载和双向荷载两种不同的动应力加载方式进行黄土循环载荷试验,对比不同动应力加载方式对黄土累积变形发展特征的影响。开展路基土体在真实的受力状态的动力变形特性研究,可更为准确的进行不同荷载耦合变化下,我国西北地区黄土场地震陷评估或路基土体变形计算,实现有效控制路基的整体稳定和工后沉降量,以期根据路基土参数预测后期沉降。深入开展不同动应力加载方式下黄土累积变形特征研究极具重要的科研和

工程意义。

1 试验土样和试验内容

1.1 试样和试验仪器

试验所用仪器为英国 WF 公司生产的 WF-12440 型动三轴-空心圆柱扭剪试验系统,采用应力控制加载方式。试验所需土样取自甘肃省临夏县北塬乡前石某砖厂,取土深度为 13 m,黄褐色,土质均匀,属 Q₃ 黄土。原状试样的基本物理性质指标详见表 1。

表 1 土样的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical indexes of soil sample

比重	密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	颗粒组成/%		
					黏粒	粉粒	砂粒
2.65	1.45~1.51	4.6~5.8	28.6	19.4	24.4	69.1	6.5

1.2 试验方法和试验条件

试验以甘肃省临夏县北塬乡黄土为试样,试样尺寸统一为 Φ50 mm×100 mm,循环加载前对试样进行偏压固结,固结比 *K*_c 选取为 1.69。待试样固结完成后,分别施加不同的动应力幅值,进行单向荷载和双向荷载作用下的黄土累积变形试验,加载波形为等效正弦波,*f*=1,加载振次为 1 000 次,试验条件见表 2。

1.3 试样应力分析

不同动荷载作用下土体的应力示意图如图 1 所示。

表 2 试验条件

Table 2 Test conditions

序号	固结条件		轴向动应力 σ_{dv} /kPa	径向动应力 σ_{dh} /kPa	
	σ_1 /kPa	σ_3 /kPa		σ_{3c}	σ_{1c}
1	200	118	10	0	10
2			20	0	20
3			30	0	30
4			50	0	50
5			90	0	90

土体待固结完成后,采用单向循环荷载的加载方式模拟交通荷载进行黄土累积变形试验时,在试样上施加单向动荷载,其45°面上会有剪应力产生,

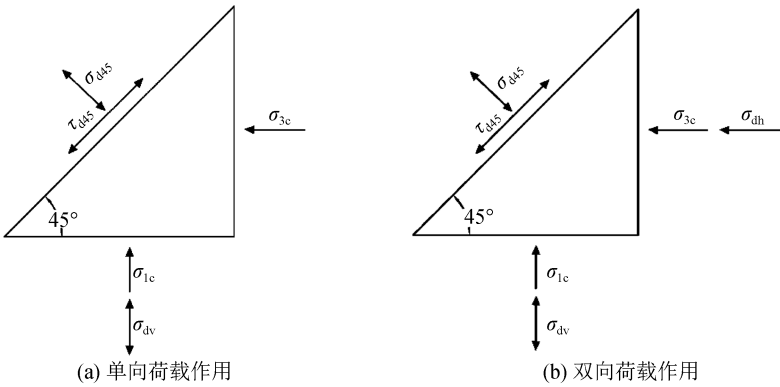


图 1 不同动荷载作用下土体应力示意图

Fig.1 The stress diagram of specimen under different dynamic loads

土体在该剪应力的作用下发生剪切变形,在该加载状态下的应力示意图如图 1(a)所示。当通过双向荷载加载方式模拟高铁荷载时,试样在轴向动应力加载的基础上,还存在着径向荷载的施加,本试验轴向荷载与径向荷载相位差为 0,即轴向荷载和径向荷载加载时同时达到应力峰值,该试样 45°剪切面

上存在剪应力和法向正应力,此加载条件下的土体应力示意图如图 1(b)所示。

2 试验数据整理及结果分析

本文采用应力加载方式进行循环荷载下的黄土累积变形试验,根据 Idriss^[18] 研究提出的软化指数

来定量分析不同加载方式下的土体累积变形发展趋势。其中,软化指数 δ 的定义如下:

$$\delta = \frac{G_{N,\max}}{G_{1,\min}} = \frac{\epsilon_{1,\max} - \epsilon_{1,\min}}{\epsilon_{N,\max} - \epsilon_{N,\min}} \quad (1)$$

式中: $G_{N,\max}$, $G_{1,\min}$ 分别为第 N 次和第 1 次循环次数土体的最大和最小割线剪切模量; $\epsilon_{1,\max}$, $\epsilon_{1,\min}$ 分别为第 1 次循环次数土体的最大和最小轴向应变;

$\epsilon_{N,\max}$, $\epsilon_{N,\min}$ 分别为第 N 次循环次数土体的最大和最小轴向应变。

2.1 不同动应力加载方式下黄土的累积变形特征

根据选取的软化指数定义式得到单向荷载和双向荷载作用下的黄土软化指数,绘制出不同动应力加载方式下黄土软化指数与循环次数关系曲线,如图 1 所示。

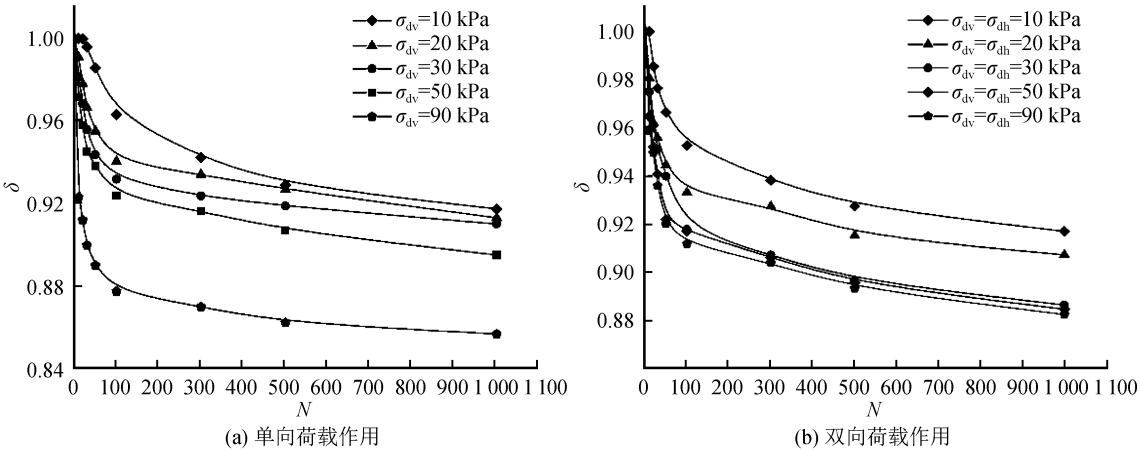


图 2 不同动应力加载方式下软化指数与循环次数关系曲线

Fig.2 The relationship curves between softening index and cycle number under different dynamic stress loading modes

由图 2 不同动应力加载方式下软化指数与循环次数关系曲线可以看出,无论是单向荷载还是双向荷载的动应力加载方式,土体在不同的动应力幅值下,其软化指数均随着循环次数的增加,呈非线性减小的趋势,土体软化程度增大。当循环次数在 100 振次以内时,其软化指数数值减小速率较后期循环振次下软化指数减小速率更大;在相同循环振次时,土体软化指数随着动应力幅值的增大而减小,动应力幅值越大,其软化指数衰减越快,单向荷载作用下,动应力幅值对土体软化指数影响更为明显。土体软化指数的减小,说明土体发生软化现象。

土体软化指数变化的规律表明:土体在单向荷载或双向荷载动应力加载作用下,前期软化速率较快,土体发生了较大变形,即剪切模量衰减较快;随着后期循环振次的增加,土体剪切模量趋于稳定,黄土逐渐密实,土体变形量较小进一步达到稳定,其软化速率也逐渐减小。径向荷载的动应力加载对动剪切模量与振次关系有明显影响,随着循环振次的不断增大,径向动循环荷载幅值越大,其对应振次的动剪切模量越小,根据 Idriss^[18] 计算所得软化指数也越小。该黄土剪切模量的发展规律与张希栋等人^[17]开展双向循环荷载耦合下黄土动模量和动剪切变形特性研究成果得到很好的印证。

2.2 不同径向荷载作用下黄土的累积变形特征

由图 3 中图(a)和图(b)软化指数曲线可以看出,当轴向动荷载分别为 10 kPa 和 20 kPa 时,对比黄土施加径向荷载前后软化指数曲线,其存在双向荷载作用时,软化指数较单向荷载作用下的土体软化指数整体偏小且衰减速率较快,说明双向荷载的加载加速了黄土的软化。

随着轴向荷载的继续增加,由图 3 中(c)和(d)所示软化指数曲线可以发现,当循环振次小于 100 次时,单向荷载与双向荷载作用下的软化指数相近,径向荷载的施加对土体软化指数的影响较弱;当循环振次大于 100 次时,随着径向荷载的不断施加,其土体软化指数减小速率明显大于未施加径向荷载的土体。由此看出,径向荷载的施加,在循环振次相对较大时,与单向荷载加载作用相比,对黄土软化影响更为显著。

软化指数曲线图 3(e)表明,当轴向动荷载增加至 90 kPa 时,同时施加径向荷载作用的土体软化指数,与仅加载轴向振动荷载且值分别为 10 kPa、20 kPa、30 kPa 和 50 kPa 时所对应的土体软化指数相比,其软化指数虽进一步减小,但明显大于该轴向振动荷载作用下的土体软化指数,即出现了单向荷载作用下土体软化程度大于双向荷载土体的现象。该

现象表明,当黄土轴向振动荷载超过一定动应力幅值时,径向荷载的施加,对黄土累积变形影响不大,

双向激振循环荷载并不能随着循环振次的增加而加速土体的软化。

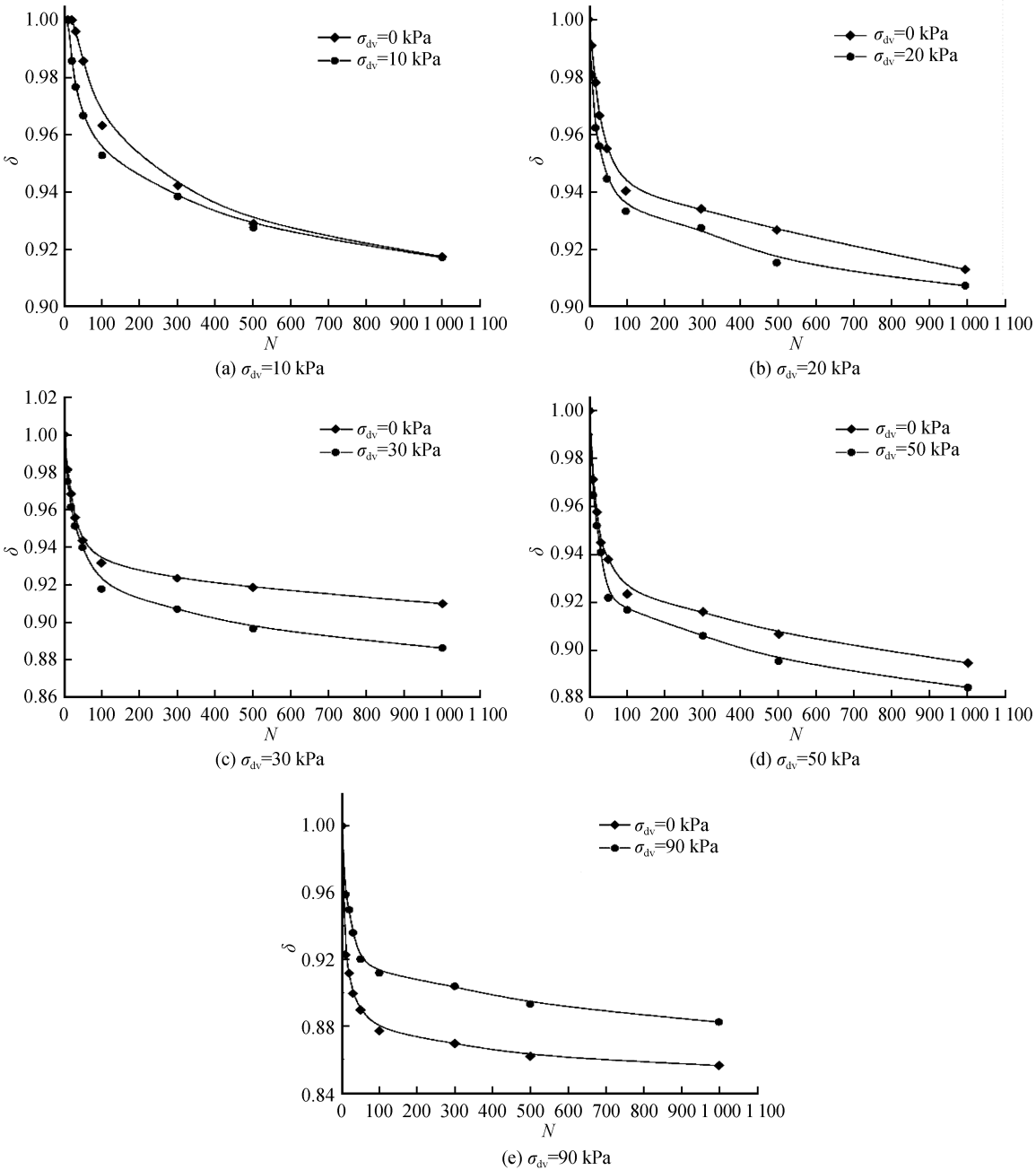


图 3 不同径向荷载作用下黄土软化指数曲线

Fig.3 The relationship curves between softening index and cycle number of loess under different radial loading modes

试验结果对比表明:随着轴向荷载的不断增加,径向荷载对加速黄土软化的影响随之减弱,当轴向荷载增加到一定动应力幅值时,其径向荷载的加载对黄土加速变形影响消失,径向荷载对于黄土累积变形的影响存在一临界轴向循环动应力,就该试验条件下,其临界轴向循环动应力幅值介于 50~90 kPa 之间。

由该黄土在不同动应力加载方式下的累积变形发展特征产生的机理初步分析可知,土体加载较小轴向荷载时,无论是单向荷载还是双向荷载,试样 45°面上剪应力值相近,而双向荷载作用下试样存在法向应力,土体受法向应力的影响主要表现为拉压动荷载下的土体变形。因此,相应变形也较单向荷载作用下土体的变形更大;随着轴向荷载的不断增

大,单向荷载作用下试样的剪应力与双向荷载时的剪应力差值逐渐拉大,且远大于双向荷载作用下的剪应力,黄土在剪切动荷载的影响下发生了剪切变形,虽双向荷载作用下试样有法向应力的存在,但随着轴向荷载的增大,其不同荷载耦合作用下,对于土样的变形影响随之减弱,说明土体在轴向循环动应力超过某一临界值时,双向激振循环荷载不能加速土体的软化,也不能加速土体累积变形的发展。

3 结论与探讨

根据对非饱和黄土单向循环荷载和双向循环荷载两种不同的动应力加载方式进行黄土累积变形特征试验研究,对比得出不同动应力加载方式对黄土变形特征的影响:

(1) 黄土在单向荷载或双向荷载作用下,其软化指数均随着循环次数的增加,呈非线性减小的趋势,在相同循环振次时,土体软化指数随着动应力幅值的增大而减小。

(2) 黄土在不同加载方式作用下,软化指数减小速率在循环振次 100 次以内较快,后期随循环振次增加,黄土逐渐趋于密实,土体软化速率逐渐趋于平稳。

(3) 黄土在双向荷载作用下,当轴向动荷载较小时,径向荷载的施加,将加速黄土的软化程度,随着轴向动荷载的增加,径向荷载对土体软化的影响逐渐减弱,其对于黄土变形的影响存在一临界轴向循环动应力。

(4) 轴向荷载较小时,双向荷载的加载方式对于黄土动变形影响显著。如实际地震发生过程时,现有单向荷载加载方式模拟地震作用进行黄土场地震陷评估显然不安全,深入开展不同动应力加载方式下黄土累积变形特征研究极具重要的科研和工程意义,可实现我国西北地区黄土场地震陷评估或路基土体变形计算,有效控制路基的整体稳定和工后沉降量,以期根据路基土参数预测后期沉降。

参考文献(References)

[1] WANG LANMIN, SUN JUNJIE, HUANG XUEFENG, et al. A field testing study on negative skin friction along piles induced by seismic subsidence of loess[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 31(1): 45-58.

[2] QIU JUNLING, WANG XIULING, LAI JINXING, et al. Response characteristics and preventions for seismic subsidence of loess in Northwest China[J]. Natural Hazards, 2018, 92(3): 1909-1935.

[3] SEED H B, PEACOCK W H. Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1971, 97(8): 1099-1199.

[4] 蔡袁强, 王军. 双向循环荷载作用下饱和软黏土动力特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(11): 62-65.

CAI Yuanqiang, WANG Jun. Study on dynamic behaviors of soft clay under bidirectional cyclic loading[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(11): 62-65.

[5] 蔡袁强, 王军, 海钧. 双向激振循环荷载作用下饱和软黏土强度和变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 495-504.

CAI Yuanqiang, WANG Jun, HAI Jun. Study on strength and deformation behaviors of soft clay under bidirectional exciting cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 27(3): 495-504.

[6] 王军. 单、双向激振循环荷载作用下饱和软黏土动力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

WANG Jun. Study on dynamic behavior of saturated soft clay under unidirectional and bidirectional cyclic loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[7] 王军, 吴延平, 蔡袁强. 强震下饱和软黏土残余变形理论与试验研究[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 25-31.

WANG Jun, WU Yanping, CAI Yuanqiang. Residual deformation theory clay under action and test study on saturated soft of strong earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(3): 25-31.

[8] 王军, 蔡袁强, 丁光亚, 等. 双向激振下饱和软黏土动模量与阻尼变化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 423-432.

WANG Jun, CAI Yuanqiang, DING Guangya, et al. Experimental research on changing rules of dynamic modulus and damping ratio of saturated soft clay under bidirectional exciting cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 29(2): 423-432.

[9] 王常晶, 陈云敏. 双向循环荷载下饱和软黏土变形特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(s): 573-576.

WANG Changjing, CHEN Yunmin. Experimental study on deformation behavior of saturated soft clay under bidirectional cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(s): 573-576.

[10] 胡秀青, 张艳, 符洪涛, 等. 水平双向荷载耦合对饱和软黏土动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 839-847.

HUANG Juehao, CHEN Jian, KE Wenhui, et al. Coupling effects of bidirectional cyclic loading and loading frequency on pore water pressure of saturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 39(s2): 71-74.

[11] 黄珏皓, 陈健, 柯文汇, 等. 双向激振循环荷载和振动频率共同作用下饱和软黏土孔压试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 39(s2): 71-74.

HU Xiuqin, ZHANG Yan, FU Hongtao, et al. Effect of horizontal bidirectional coupled loads on dynamic properties of saturated soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 839-847.

- [16] 谢定义.土动力学[M].北京:高等教育出版社,2011.
XIE Dingyi. Soil dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
 - [17] 曾长女,刘汉龙,陈育民.细粒含量对粉土孔压发展模式影响的试验研究[J].岩土力学,2008,29(8):2193-2198.
ZENG Changnv, LIU Hanlong, CHEN Yuming. Test study on influence of fine particle content on dynamic pore water pressure development mode of silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2193-2198.
 - [18] 褚卫瑞.细粒含量对尾矿砂动力特性影响研究[J].矿业研究与开发,2017,37(2):70-73.
CHU Weirui. Influence of fine content on dynamic characteristics of tailings sand [J]. Mining Research and Development, 2017, 37(2): 70-73.
 - [19] 马一雾,冯艳辉,王武刚.淮南地区饱和粉土孔压模型试验与有限元对比分析[J].建筑结构,2017,47(增刊1):1166-1169.
MA Yiji, FENG Yanhui, WANG Wugang. Tri-axial test research and finite element analysis of liquefaction behavior of saturated silt of Huainan area [J]. Building Structure, 2017, 47 (Suppl01): 1166-1169.

(上接第 1213 页)

- [12] 黄博,胡俊清,施明雄,等.单、双向动三轴试验条件下饱和砂和砂动力特性对比[J].西北地震学报,2011,33(增刊1):137-142.
HUANG Bo, HU Junqing, SHI Mingxiong, et al. Comparison of dynamic properties of saturated sand under unidirectional and two-directional cyclic triaxial tests conditions[J]. North-western Seismological Journal, 2011, 33(Suppl01): 137-142.
 - [13] 刘潇,张学,赵俭斌,等.单、双向振动条件下饱和粉砂变形特性对比试验研究[J].地震工程学报,2015,37(3):748-753.
LIU Xiao, ZHANG Xue, ZHAO Jianbin, et al. Study on deformation characteristics of saturated silty sand in uni-and bi-directional cyclic triaxial tests[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 748-753.
 - [14] 周小生.双向循环荷载作用下膨胀土的动力特性与路基响应特征研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2010.
ZHOU Xiaosheng. The dynamic characteristics of expansive soil and dynamic behaviors of subgrade under the bidirectional cyclic loading[D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P.R.China, 2010.
 - [15] 马宇涛.南阳膨胀土的双向动力特性试验研究[D].郑州:华北水利电力大学,2017.
MA Yutao. Nanyang expansive soil test study on the dynamic characteristics of bidirectional[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.
 - [16] 王救鹏,骆亚生,刘建龙,等.双向动荷载下重塑红黏土动变形特性研究[J].地震工程学报,2017,39(6):1046-1053.
WANG Mipeng, LUO Yasheng, LIU Jianlong, et al. Dynamic deformation characteristics of remolded red clay under bi-directional dynamic load[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1046-1053.
 - [17] 张希栋,骆亚生.双向动荷载下黄土的动剪切模量特性研究[J].岩土力学,2015,36(9):2591-2598.
ZHANG Xidong, LUO Yasheng. Study of dynamic shear modulus of loess under bidirectional dynamic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2591-2598.
 - [18] IDRISSE I M, DOBRY R, SINGH R D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation, 1978, 104(12): 1427-1447.