# 双向循环荷载耦合下黄土动模量和动变形特性研究。

张希栋,骆亚生,王鹏程

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100))

摘要:通过在三轴试样的轴向和径向同时施加循环荷载,并以试样 45°面上的应力来模拟地震拉压 动荷载和剪切动荷载的作用,分析双向循环荷载耦合下黄土的动剪切模量和动变形特性。试验结 果表明:相位差对黄土的动剪切模量有一定影响,其动剪切模量随相位差的增大以 φ=180°为转折 点呈现先减小后增大的趋势,在 φ=180°时达到最低水平。φ<180°时相位差的增大加速了黄土动 剪应变的发展,φ>180°时黄土的动剪切变形的发展速度随相位差的增大而减缓。同时径向动荷载 幅值的增大明显降低黄土的初始动剪切模量。通过计算转化,分析拉压动荷载和剪切动荷载变化 对黄土动剪切变形发展的影响规律,发现拉压动荷载的施加能加快黄土动剪切变形的发展,而当拉 压和剪切动荷载同时变化时,剪切动荷载变化对黄土动剪切变形发展的影响更明显,作用更显著。 关键词:双向循环荷载;相位差;动剪切模量;动剪应变;黄土

 中图分类号: TU444
 文献标志码:A
 文章编号: 1000-0844(2015)02-0505-07

 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0505

## Study on Dynamic Modulus and Dynamic Deformation Characteristics of Loess under Bidirectional Cyclic Loading

## ZHANG Xi-dong, LUO Ya-sheng, WANG Peng-cheng

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A and F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: When an earthquake occurs, seismic waves propagating from the earthquake source to the ground include transverse waves (S-waves) and longitudinal waves (P-waves). Transverse waves produce dynamic shear loads whereas longitudinal waves produces dynamic tension and compression loads. Consequently, under the effects of these two dynamic loads, horizontal shear vibration and vertical tension and compression vibration occur simultaneously in loess. By simultaneously applying axial and radial dynamic loads on a triaxial specimen and using stress on the surface of the specimen at an angle of 45°, the effects of seismic tension and compression and shear dynamic loads are simulated and the characteristics of the dynamic shear modulus and dynamic strain of loess are analyzed under bidirectional cyclic load coupling. The test results indicate that phase difference has certain effects on the dynamic shear modulus of loess. With  $\varphi = 180^{\circ}$  as the turning point, the dynamic shear modulus of loess decreases first and then increases with increase in the phase difference, and when the phase difference is  $180^{\circ}$ , the loess dynamic shear modulus decreases to its lowest level. Analysis of the initial dynamic shear modulus of loess under the bidirectional cyclic loads shows that with increase in the phase difference, the initial dynamic shear modulus. When

基金项目:国家自然科学基金(51178392)

作者简介:张希栋(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为黄土动力学特性.E-mail:zhangxd123456@163.com 通讯作者:骆亚生(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事黄土力学与工程方面的研究.E-mail:lyas@public.xa.sn.cn the phase difference is in the range of  $0^{\circ}$  to  $90^{\circ}$ , the initial dynamic shear modulus of loess decreases quickly, but when it is in the range of 90° to 180°, the decline velocity slows down. Correspondingly, the initial dynamic shear modulus increases slowly when the phase difference is in the range of 180° to 270°; however, the increase in the velocity of the initial dynamic shear modulus becomes higher when the phase difference is in the range of 270° to 360°. When the value of the confining pressure is 200 kPa and the radial vibration amplitude is 20 kPa, the initial dynamic shear modulus of loess under the phase difference of 180° accounts for only 10.77% of that under the phase difference of  $0^{\circ}$ , which is a decrease of approximately 90%, and the decline ratio shows an increasing trend with increase in the radial vibration amplitude. This indicates that the phase difference has significant effects on the initial dynamic shear modulus of loess, especially when the loess is exposed to bidirectional cyclic loads, with a phase difference of 180° between the axial and radial loads, the loess initial dynamic shear modulus drops dramatically and the ability of loess to resist the shear deformation becomes very weak or even lost. When the phase difference is less than 180°, its increase tends to accelerate the development of the loess' dynamic shear strain, and when the phase difference is greater than 180°, the development of the loess' dynamic shear strain reduces with its increase. The test results show that the load combination with a radial vibration amplitude of 60 kPa and phase difference of 180° has the most unfavorable effects on the deformation development of loess, and the dynamic shear strain of loess rises almost linearly with the increase of cycles under this combination. As a result, the destruction of loess occurs in a few cycles. Therefore, high radial vibration amplitudes should be avoided when the phase difference between the axial and radial dynamic load is 180° in practical projects.By calculating transformation, the manner in which the changes in the dynamic tension and compression and shear loads affect the development of the dynamic shear strain of loess is analyzed. The results show that the dynamic tension and compression load quickens the increase of the dynamic shear strain of loess, and when the dynamic tension and compression and shear loads change synchronically, the change of the dynamic shear load has more prominent impacts on the development of the dynamic shear strain of loess.

Key words: bidirectional cyclic load; phase difference; dynamic shear modulus; dynamic shear strain; loess

## 0 引言

1964 年美国阿拉斯加地震和日本新泻地震使 人们开始认识到地震荷载的危害性,开始深入展开 地震荷载作用下土体的动力特性研究<sup>[1]</sup>。室内动三 轴试验是国内外学者最常用的一种测试土体在动荷 载作用下力学反应的方法。目前,大部分学者利用 动三轴仪模拟地震荷载时,均沿袭 Seed 等<sup>[2-4]</sup>提出 的将地震作用简化为一水平剪切动荷载的方法,且 认为地震的破坏主要是由动剪切荷载引起的。地震 发生时,从震源向地面传播的地震波主要包括横波 和纵波,横波产生剪切动荷载,纵波产生拉压动荷 载,土体在这两种动荷载的作用下会同时发生水平 剪切振动和竖向拉压振动。由于纵波向上传播时衰 减速度较快<sup>[5]</sup>,当震源较深或者震级较小时,纵波传 播到地面时加速度已衰减至很小,此时可以忽略拉 压动荷载对地基土体和其上部建筑物的影响,只考 虑剪切动荷载的作用,这也是 Seed 等进行地震荷载 模拟时的理论依据。但是在浅震源地震中,地震产 生的纵波振幅大、传播距离短,其到达地面时波动未 能达到完全衰减,此时忽略拉压动荷载对地基土体 及建筑物的作用显然是不合理的。城市直下型地震 往往震源浅、震级大,因此很多建筑物都是在拉压动 荷载作用下产生过大的竖向变形而破坏,如 1976 年 唐山大地震<sup>[6]</sup>、1986 年圣萨尔瓦多地震<sup>[7]</sup>、1995 年 日本阪神地震<sup>[8]</sup>等。因此,对土体进行动力特性试 验研究时,如果能同时给试样施加拉压动荷载和剪 切动荷载,使其受力状态更加接近地震作用下土体 的实际动应力状态,从而可以为土工抗震设计提供 更加精确的土体动力参数。国内外学者在轴向拉压 和扭转剪切耦合下对土体动力特性进行了大量研 究,如 K. Kabilamany 等<sup>[9-12]</sup>,但利用双向动三轴仪 进行双向激振耦合下的研究还较少。蔡袁强等<sup>[13]</sup> 在双向激振下探究饱和软黏土的强度特性,发现径 向动荷载的施加加速了土体强度衰减。谷川<sup>[5]</sup>在 P 波和 S 波耦合下对饱和软黏土进行了地震荷载模拟 试验,得出在强震过程中不可忽略 P 波作用。Rascal<sup>[14]</sup>在拉压动荷载和剪切动荷载下研究了饱和砂 土的液化特性,认为在某些情况下拉压和剪切动荷 载同时作用可以加快砂土液化。

黄土为一种典型的区域性特殊土,主要分布在 我国干旱、半干旱的中西部地区,这些地区地震频繁 发生且烈度较高,因而研究黄土在拉压和剪切动荷 载耦合下的动力特性是十分必要的。土体的动剪切 模量是土体动力反应分析的重要参数之一<sup>[15]</sup>。基 于目前很少有人研究黄土在双向动荷载下力学特性 的现状,本文拟在双向激振耦合下探究黄土的动剪 切模量和动变形特性,主要分析径向动荷载幅值和 相位差对黄土动剪切模量和动变形发展的影响,对 黄土地区的抗震设计具有积极的指导作用。

## 1 试验土样和试验方法

#### 1.1 试验土样

试验所用土样取自陕西省泾阳县太平镇崔师某砖厂,取土深度5~6m,属Q。黄土。酒精燃烧法测得土样天然含水率为16.1%,天然干密度为1.28g/cm<sup>3</sup>,土粒比重2.74,通过标准击实实验测得最大干密度为1.70g/cm<sup>3</sup>,最优含水率18.1%。土样液限为32.7%,塑限为16.5%,土样根据塑性土分类为低液限黏土。本次试验采用重塑试样,干密度为1.53g/cm<sup>3</sup>,含水率为16.1%。试样为实心圆柱形,直径39.1mm,高度80mm。

## 1.2 试验方法

考虑到地震荷载作用的短暂性,本文采用固结 不排水动三轴试验,具体试验方案见表 1。试验方 案中,循环偏应力为轴向动荷载和径向动荷载的差 值,即 $q_d = \sigma_{dv} - \sigma_{dh}$ 。初始循环偏应力则为初始轴 向动荷载幅值与径向动荷载幅值的差值,即 $q_{ds} = \sigma_{dvms} - \sigma_{dhm}$ 。试验过程中,先对试样施加固结压力进 行固结,待 30 min 试样的轴向变形不大于 0.01 mm 时认为试样固结稳定。固结完毕后进行双向激振, 轴向和径向同时施加同频率的简谐荷载(波型为正 弦波,频率为 1 Hz)。轴向动荷载采用分级加载,动 荷载幅值逐级递增,递增幅度为5kPa,径向动荷载 幅值为一定值,每一级荷载激振5次,直至试样的轴 向动应变大于5%,认为试样破坏。进行数据分析 时选取每级动荷载第三周次的数据。双向动荷载作 用下试样的应力示意图如图1所示。

表 1 试验方案一览

Table 1 Testing program

固结	固结围压	初始循环偏应	径向动荷载幅	有 相位差
方式	$\sigma_{\rm 3c}/{ m kPa}$	力 $q_{ m  ds}/{ m kPa}$	值 $\sigma_{\rm dhm}/{ m kPa}$	$arphi/(\circ)$
			20 40	0,45,90,
等压固结	200,300	10	20,40,	135,180,225,
			60	270,315,360



图 1 双向动荷载下试样的应力示意图 Fig.1 Stress diagram of sample under bidirectional dynamic loads

图 1 中,σ<sub>dv</sub>和σ<sub>dh</sub>分别为轴向和径向动荷载,σ<sub>1</sub>e 和σ<sub>3c</sub>分别为轴向、径向固结压力。由图 1 可以看 出,双向激振下试样 45°剪切面上同时存在垂直于 剪切面的拉压动荷载σ<sub>d</sub>和平行于剪切面的剪切动 荷载τ<sub>d</sub>,这可以很好地模拟强地震下纵波和横波的 同时作用。

$$\sigma_{\rm d} = \sigma_{\rm 3c} + (\sigma_{\rm dv} + \sigma_{\rm dh})/2 \tag{1}$$

$$\tau_{\rm d} = (\sigma_{\rm dv} - \sigma_{\rm dh})/2 \tag{2}$$

由式(1)、式(2)可以看出,固结围压一定时, $\sigma_{d}$ 和 $\tau_{d}$ 主要由轴向动荷载和径向动荷载的大小决定,因此 通过控制轴向动荷载和径向动荷载的相位差以及径 向动荷载幅值的大小得到 $\sigma_{d}$ 和 $\tau_{d}$ 的不同组合,并 分析其对黄土动剪切模量和动变形的影响。然后利 用土体在每一次循环荷载作用下的应力-应变滞回 圈(如图 2 所示)来近似计算土体的动弹性模量,计 算公式为式(3),并利用式(4)和式(5)由动弹性模量  $E_{d}$ 和动应变 $\varepsilon_{d}$ 换算出土体的动剪切模量  $G_{d}$ 和动 剪应变 $\gamma_{d}$ 。

$$E_{\rm d} = (q_{\rm dmin} - q_{\rm dmin}) / (\varepsilon_{\rm dmax} - \varepsilon_{\rm dmin})$$
(3)

$$G_{\rm d} = E_{\rm d}/2(1+\mu)$$
 (4)

$$\gamma_{\rm d} = \varepsilon_{\rm d} (1 + \mu) \tag{5}$$

式(3)中, $q_{\text{dmax}}$ 和 $q_{\text{dmin}}$ 分别为每一循环中土体的最大和最小偏应力; $\epsilon_{\text{dmax}}$ 和  $\epsilon_{\text{dmin}}$ 分别为每一循环中的最大和最小动应变。式(4)和(5)中  $\mu$ 为土体的泊松比。本文拟通过动三轴试验来分析黄土的动剪切模量的变化规律,故采用了上述换算方法,并根据试验材料为低液限黏土取其泊松比  $\mu=0.4$ 。



图 2 动弹性模量计算示意图 Fig.2 Calculation of the dynamic elastic modulus

#### 2 试验结果分析

#### 2.1 双向循环荷载耦合下黄土的滞回曲线

本文同时在围压 200 kPa 和 300 kPa 下进行试验,由于得出结论基本一致,限于篇幅,本文主要展示围压 200 kPa 下的试验结果。

为了使滞回曲线更加清晰,图 3 展示了围压 200 kPa下,实测的试样在 6~10 级动荷载下的应 力-应变滞回曲线。图 3 表明,试样的滞回曲线受相 位差的影响较小,均呈近似椭圆形,但是相位差的变 化对土体拉压变形的发展趋势有明显影响,相位差 为 0°时,试样在 10 级(循环 50 次)动荷载作用后, 动变形主要以压缩变形(正应变)为主;而相位差为 180°时,10 级动荷载作用后试样呈拉伸变形(负应 变)增长趋势,且动变形发展速度明显快于相位差为 0°时变形发展。在相位差小于 180°时,试样的动变 形发展随着相位差的增大由压缩变形向拉伸变形过 渡,当相位差大于 180°时,这种趋势则随着相位差 的增大呈相反的规律。

## 2.2 相位差对黄土动剪切模量的影响

图 4 为径向动荷载一定时不同相位差下黄土的 G<sub>d</sub>-γ<sub>d</sub>曲线,从图 4 可以看出,相位差为 180°时黄土 的 G<sub>d</sub>-γ<sub>d</sub>曲线处于最低水平,相位差从 0°至 180°逐 渐增大时动剪切模量水平逐渐减小;相位差从 180° 至 360°逐渐增大时动剪切模量水平逐渐增大;当相 位差为 180°时,试样在初始动应力作用下,应变急 剧增大,动剪切模量在一个很小的范围内衰减。图 4 还表明,相位差对黄土的动剪切模量的影响在动



图 3 应力-应变实测滞回曲线 $(n=6\sim10,\sigma_{dmin}=20 \text{ kPa})$ Fig.3 Stress-strain hysteresis curves measured by test  $(n=6\sim10,\sigma_{dmin}=20 \text{ kPa})$ 

剪应变较小(小于 2%)时相对比较明显,在动剪应 变较大时,不同相位差下 G<sub>d</sub>-γ<sub>d</sub> 曲线几乎重合。(1/ G<sub>d</sub>)-γ<sub>d</sub> 关系具有良好的线性,故:

$$1/G_{\rm d} = a + b\gamma_{\rm d} \tag{6}$$

式中, $G_d$ 为动剪切模量; $\gamma_d$ 为动剪应变,a、b分别为 (1/ $G_d$ )- $\gamma_d$ 关系线的截距和斜率,实测的(1/ $G_d$ )- $\gamma_d$ 关系线如图 5 所示。当 $\gamma_d$ =0时, $1/G_0$ =a,因此求 出(1/ $G_d$ )- $\gamma_d$ 关系线的截距即可反算出初始动剪切 模量  $G_0$ =1/a。为进一步探究相位差对小应变下黄 土动剪切模量的影响,利用(1/ $G_d$ )- $\gamma_d$ 关系反算出 不同相位差下的初始动剪切模量  $G_0$ ,定量分析了相 位差对初始动剪切模量的影响。

图 6 为围压 200 kPa 下黄土的初始动剪切模 量随相位差的变化曲线。从图 6 可以看出,相位差 对初始动剪切模量的影响以  $\varphi = 180^{\circ}$ 为转折点呈相 反的规律,当  $\varphi < 180^{\circ}$ 时初始动剪切模量随着相位 差的增大而减小,并且在  $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内 G。衰减很



- 图 4 动剪切模量与动剪应变关系曲线 ( $\sigma_{3c} = 200$ kPa, $\sigma_{dhm} = 40$  kPa)
- Fig. 4 Relationship between dynamic shear modulus and dynamic shear strain ( $\sigma_{3c} = 200 \text{ kPa}, \sigma_{dhm} = 40 \text{ kPa}$ )



图 5 实测黄土的 $(1/G_d)$ - $\gamma_d$ 关系

Fig.5 Relationship between  $1/G_d$  and  $\gamma_d$  of loess measured by test





Fig.6 Relationship between initial dynamic shear modulus and phase difference

快,90°~180°范围内其衰减速度相对减缓;当 φ> 180°时初始动剪切模量随相位差的增大而增大,增 长速度和 0°~180°范围内的衰减速度基本呈对称关 系。图 6 还表明,径向动荷载幅值越大,土体的初始 动剪切模量越小,这说明以往在单向动荷载作用下 测得的土体动力参数用于抗震设计时是偏于不安全 的。

表 2 为围压 200 kPa下相位差 0°和相位差 180° 下土体的初始动剪切模量比较情况。由表 2 可以看 出,径向动荷载幅值为 20 kPa时,土体在相位差 180°时的初始动剪切模量值仅为其在相位差 0°时的 10.77%,衰减了近 90%,而且衰减率随着径向动荷 载幅值的增大呈增大趋势。由此可以得出,相位差 对黄土初始动剪切模量的影响非常大,当土体所承 受的轴向动荷载和径向动荷载的相位差为 180°(反 相)时,其初始动剪切模量急剧衰减,此时土体在初 始动荷载作用下抵抗剪切变形的能力将非常微弱, 甚至丧失。在实际地震中,一旦出现这类动荷载组 合,对地基土体的抗震是极为不利的。

## 表 2 相位差 0°和 180°下初始动剪切模量比较

Table 2 Comparison of initial dynamic shear modulus under  $\varphi = 0^{\circ}$  and  $\varphi = 180^{\circ}$ 

$\sigma_{ m dhm} /  m kPa$	$G_{0(arphi=0^\circ)}/\mathrm{MPa}$	$G_{0(arphi=180^\circ)}\/\mathrm{MPa}$	$G_{0(\varphi=180^\circ)}/G_{0(\varphi=0^\circ)}/\%$	G <sub>0</sub> 衰减 率 η/%
20	68.8	7.4	10.77	89.23
40	57.1	4.5	7.89	92.11
60	46.9	3.2	6.79	93.21

## 2.3 双向激振耦合下黄土的动剪应变发展

图 7 为动剪应变与循环次数的关系曲线。图 7 (a)、(b)为径向动荷载幅值一定时不同相位差下的  $\gamma_{d}$ -N 关系曲线,可以看出: $\varphi = 180^{\circ}$ 时动剪应变的发 展速度最快,动剪应变随动荷载施加的发展也以相 位差 180°为分界点呈相反的变化趋势;当  $\varphi < 180^{\circ}$ 时随着相位差的增大,动剪应变发展速度加快;当 $\phi$ >180°时动剪应变的发展速度随相位差的增大而减 小。图 7(c)、(d)分别为  $\varphi = 0^{\circ} \pi \varphi = 180^{\circ}$ 时不同径 向动荷载幅值下的 γ<sub>d</sub>-N 关系曲线,图 7(c)、(d)表 明,径向动荷载幅值的增大加快了土体动剪应变的 发展速度,图7(d)还表明,轴向和径向动荷载的耦 合对土体的动应变发展具有明显的影响,当 $\varphi =$ 180°时随着径向动荷载幅值的增大,动剪应变的发 展速度急剧加快,当 $\sigma_{dhm}$ =60 kPa 时土体的动剪应 变随着循环次数的增大几乎呈高斜率的线性增大, 土体在这种动荷载组合下在很少的循环次数下即发 生破坏。

图 8 为围压 200 kPa下,循环荷载激振 8 次时, 试样的动剪应变随相位差和径向动荷载幅值的变 化。图 8 中动剪应变随相位差和径向动荷载幅值的





变化规律和图 7 一致,从图 8 可以很明显看出  $\sigma_{dhm}$ =60 kPa 和  $\varphi$ =180°时的荷载组合为对土体动变形 发展的最不利组合,在该动荷载组合下,黄土动剪应 变为  $\sigma_{dhm}$ =20 kPa、 $\varphi$ =180°组合以及 $\sigma_{dhm}$ =60 kPa、  $\varphi$ =0°组合下的 20.9 倍和 46.4 倍,因此在实际工程 中,应尽量避免这种轴向和径向反相且径向荷载强 度较大的动荷载组合。

## 2.4 拉压和剪切动荷载耦合对黄土动变形的影响 为了将双向循环荷载耦合情况反应到试样 45°



Fig.8 Relationship between dynamic shear strain and phase difference

面的拉压动荷载和剪切动荷载的耦合上,将轴向、径 向动荷载的计算式(7)、(8)代入式(1)、(2)计算 $\sigma_a$ 和 $\tau_a$ 随相位差和径向动荷载幅值的变化规律,从而 得出 $\sigma_a$ 和 $\tau_a$ 耦合对土体变形发展的影响,具体如 表3所示。

$$\sigma_{\rm dv} = \sigma_{\rm dvm} (\sin 2\pi t + \varphi) \tag{7}$$

$$\sigma_{\rm dh} = \sigma_{\rm dhm} \sin 2\pi t \tag{8}$$

式(7)、(8)中, $\sigma_{dv}$ 和 $\sigma_{dh}$ 分别为轴向和径向动荷载;  $\sigma_{dvm}$ 和 $\sigma_{dhm}$ 分别为轴向、径向动荷载幅值; $\varphi$ 为相位差。

#### 表 3 拉压和剪切动荷载耦合对黄土动变形的影响

 

 Table 3
 Effects of the coupling of tension & compression and shear dynamic loads on the dynamic deformation of loess

因素		$\sigma_{ m d}^{ m ampl}$	$ au_{\mathrm{d}}^{\mathrm{ampl}}$	γ <sub>d</sub> 发展
φ增大	$0^{\circ} \sim \! 180^{\circ}$	减小	增大	加快
	$180^{\circ} \sim 360^{\circ}$	增大	减小	减缓
$\sigma_{dhm}$ 增大		增大	不变	加快

由表 3 可以看出,当剪切动荷载幅值不变,拉压 动荷载幅值增大时土体的动剪切变形发展加快,这 说明拉压动荷载的施加有加速土体动剪切变形发展 的作用。当拉压动荷载幅值和剪切动荷载幅值同时 发生变化,不论拉压动荷载幅值增减与否,试样动剪 切变形的发展均随着剪切动荷载幅值的增大而加 快,随其减小而减缓,也即拉压与剪切动荷载耦合 时,剪切动荷载对土体动变形的发展影响更大,作用 更显著。这和本文试样所施加的动应力状态有关, 本文中试样所受的固结围压较大,试样 45°面上的 拉压动荷载始终大于零,因此其为一个广义的拉压 作用,其本质为一个单向的压缩动荷载,而谢定义[1] 认为土体在单向动荷载作用下,其强度较双向动荷 载作用下更高,变形发展更缓慢。因此,如果地基土 体的周围约束较小,其在地震拉压和地震剪切动荷 载的耦合作用下,会更加容易发生失稳破坏。

## 3 结论

本文通过在三轴试样上同时施加轴向和径向动 荷载作用,探究双向循环荷载耦合下黄土的动剪切 模量和动变形特性,初步得到以下结论:

(1)相位差对黄土的动剪切模量有一定影响。 径向动荷载幅值一定时,黄土的动剪切模量在相位 差为180°时处于最低水平,相位差从0°~180°增大 时黄土的动剪切模量逐渐减小,从180°~360°增大 时其动剪切模量增大。

(2)相位差对黄土的初始动剪切模量有明显的 影响。 $\sigma_{dhm}$ =20 kPa、 $\varphi$ =180°时的初始动剪切模量 仅为 $\varphi$ =0°时的10.77%,衰减了将近90%,且初始 动剪切模量的衰减率随径向动荷载幅值的增大呈增 大趋势。

(3)相位差和径向动荷载幅值对黄土动剪切应 变的发展均有明显的影响。当 $\varphi < 180°$ 时,相位差 的增大加快了黄土的动剪切应变发展;当 $\varphi > 180°$ 时,动剪应变的发展随相位差的增大而减缓。径向 动荷载幅值越大,黄土的动剪切变形发展也越快。

(4) 拉压动荷载的作用加快了土体动变形的发展,但是拉压动荷载和剪切动荷载耦合作用时,剪切动荷载对土体动变形的发展影响更大,作用更明显。

## 参考文献(References)

- [1] 谢定义. 土动力学[M].北京:高等教育出版社,2011.
   XIE Ding-yi. Soil Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press,2011.(in Chinese)
- [2] Seed H B,Lee K L.Liquefaction of Saturated Sand During Cyclic Loading[J].Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1966, 92(6):105-134.
- [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):1099-1119.
- [4] Seed H B,Idriss I M.Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1971, 97(9):1249-1273.
- [5] 谷川,蔡袁强,王军.地震P波和S波耦合的变围压动三轴试验 模拟[J].岩土工程学报,2012,34(10):1903-1909.
  GU Chuan, CAI Yuan-qiang, WANG Jun. Coupling Effects of P-waves and S-waves Based on Cyclic Triaxial Tests With Cyclic Confininf Pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(10):1903-1909. (in Chinese)

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

WANG Jun, CAI Yuan-qiang, DING Guang-ya, et al. Experimental Research on Characteristics of Dynamic Modulus and Damping Ratio of Saturated Soft Clay Under Bidirectional Exciting cyclic Loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2):423-432. (in Chinese)

- [7] Bommer J J, Georgallides G, Tromans I J. Is There Near-field for Smal-to-moderate Magnitude Earthquakes? [J].Journal of Earthquake Engineering, 2001,5(3):395-423.
- [8] 周建,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)
- [9] Kabilamany K, Ishihara K.Cyclic Behavior of Sand by the Multiple Shear Mechanism Model [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1991, 10(2):97-101.
- [10] Trandafir A C, Sassa K. Undrained Cyclic Shear Response Evaluation of Sand Based on Undrained Monotonic Ring Shear Tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(11):781-787.
- [11] Boulanger R W, Seed R B.Liquefaction of Sand Under Bidirectional Monotonic and Cyclic Loading[J].Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(12): 870-878.
- [12] 王洪瑾,沈瑞福,马奇国.双向振动下土的动强度[J].清华大 学学报:自然科学版,1996,36(4):93-98.
  WANG Hong-jin, SHEN Rui-fu, MA Qi-guo. Dynamic Strength of Soil Under Multi-direction Loading[J].Journal of Tsinghua University:Sci & Tech,1996,36(4):93-98.(in Chinese)
- [13] 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 Yuan-qiang, WANG Jun, HAI Jun. Study on Strength and Deformation Behaviors of Soft Clay Under Bidirectional Exciting Cyclic Loading[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3):495-504. (in Chinese)

- [14] Rascol.Cyclic Properties of Sand: Dynamic Behavior for Seismic Applications [D]. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, 2009.
- [15] Zen K, Higuchi Y.Prediction of Vibratory Shear Modulus and Damping Ratio for Cohesive Soils[C]//Proceedings of The 8th World Conference on Earthquake Engineering, 1984; 23-30.(in Chinese)