

循环荷载下渭北地区黄土动力特性分析

张 勇^{1,2}, 钱家志¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究渭北地区的黄土动力学特性分析, 通过 TYS-20 型土动三轴试验机, 研究不同围压下黄土的动本构关系以及动骨干曲线, 分析黄土的动剪模量比和阻尼比的关系, 提出动剪切模量衰减模型和阻尼增长模型; 研究不同围压对黄土动强度和残余应变的影响, 从理论上解释黄土动力特性变化的原因, 从而更好地保证黄土震陷对地下空间影响最小化; 最后对比黄土震前震后微结构, 并进行机理分析对该地区地下空间发展提供理论意义。研究结果显示: 黄土的动本构关系符合双曲线模型; 动剪模量比随动剪应变呈负指数衰减关系, 而阻尼比随动剪应变呈对数关系增长; 动强度和动强度指标受试验条件的影响较大, 其中动强度随围压的增大而增大, 表明动强度分析能较好地说明黄土的动力特性变化规律; 根据电子显微镜对比土体震前震后微结构, 并进行机理分析, 为该地区地下空间发展提供理论支持。通过研究表明, 渭北地区黄土在循环荷载作用下不易产生振动变形, 属于轻微震陷区。

关键词: 动本构关系; 动剪切模量比; 阻尼比; 动强度; 黄土震陷

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0535-09

Analysis of dynamic properties of loess in Weibei area under cyclic loading

ZHANG Yong^{1,2}, QIAN Jiazhi¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of loess in Weibei area, the dynamic constitutive relationship and dynamic backbone curve of loess under different confining pressures were studied by TYS-20 soil dynamic triaxial testing machine. The relationship between dynamic shear modulus ratio and damping ratio of loess was analyzed, and a dynamic shear modulus attenuation model and a damping growth model were proposed. The influence of different confining pressures on the dynamic strength and residual strain of loess was studied, and the reasons for the change of dynamic characteristics of loess were explained theoretically, so as to better ensure the minimization of the influence of loess seismic subsidence on underground space. Finally, the microstructure of loess before and after earthquake was compared, and the mechanism analysis was carried out to provide theoretical significance for the development of underground space in this area. The results show that the dynamic constitutive relationship of loess conforms to the hyperbolic model, and the dynamic shear modulus ratio decreases exponentially with the dynamic shear strain, while the damping ratio increases logarithmically with the dynamic shear strain. The dynamic strength and dynamic strength index are greatly affected by the test conditions, and the dynamic strength increases with the increase of confining pressure, indicating that the dynamic strength analysis can better explain the dynamic characteristics of loess. The microstructure of soil before and after earthquake is compared by electron microscope. The microstructure of soil before and after earthquake is compared by electron microscope, and the mechanism analysis is carried out, which provides theoretical support for the development of underground space in this area. The results show that the loess in Weibei area, which belongs to slight seismic subsidence area, is less prone to vibration deformation under cyclic loading.

Key words: dynamic constitutive relationship; dynamic shear modulus ratio; damping ratio; dynamic strength; loess seismic subsidence

收稿日期: 2023-07-31

修回日期: 2024-06-04

基金项目: 引汉济渭联合基金项目(2021JLM-52)

第一作者: 张 勇(1965—), 男, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为输水管线、黄土震陷、绿色建造。E-mail: xadayong@126.com

在我国的西北地区,黄土占比很大,而黄土作为新生代时期形成的一种特殊大孔隙、弱胶结的土状物,广泛地分布在陕甘宁等地区,占我国国土面积的 6.6%,所以,在施工中必须考虑黄土的特殊性为工程带来的影响和危害。黄土具有独特的物理性质和特殊的架空孔隙结构,震陷性是黄土最典型的灾害特征之一。在地下空间建设中,产生的动荷载累积会导致工程的不均匀沉降、开裂变形等稳定性问题,因此,国内外学者在黄土的动力特性方面进行了大量工作,研究表明土体的动弹性模量和阻尼比是最基本的参数,也是工程实际中进行稳定性分析中需要考虑的动力参数^[1-2]。

某引水工程需跨越陕西渭北黄土塬区地貌单元,该区黄土覆盖层厚且具有明显的结构性特征。由于其地质特性,地震发生时容易引发震陷灾害。为此,深入研究沿线地区的黄土动力特性,将会对该工程震害预防和工程安全性提供重要的帮助。王兰民等^[3]研究在地震荷载作用下的黄土动力特性,为黄土研究奠定了基础;Che 等^[4]采用动三轴试验比较不同动应力加载方式对黄土震陷发育的影响;Katuwal S 等^[5-7]通过 CT 扫描技术,在微观角度研究黄土大孔隙结构在浸水过程中受力过程,为黄土细观结构结合宏观力学的研究奠定了基础;王雪艳等^[8]通过有限元验证陕北地区 Q3 黄土的内摩擦角和黏聚力均呈正态分布和对数正态分布;刘妮娜等^[9]利用 GDS 动三轴试验研究进断层区黄土动剪切模量和饱和度、固结比呈负相关性,与振动频率呈正相关性;李帅等^[10]研究了黄土在循环荷载下的动力学特性,结合电子显微镜振动土样,解释黄土动力特性变化的原因;王峻等^[11]研究了地震前后兰州黄土的动弹性模量和阻尼比的差异性;Ishihara K 等^[12]通过动三轴试验研究黄土的动剪切模量和阻尼比,得出土的滞回曲线变

化的规律,并结合 Hardin-Drnevich 模型^[13]得出循环荷载下土体的动本构模型;王谦等^[14-15]通过动三轴试验研究饱和黄土原始状态下的孔隙比对最大动剪切模量影响较大,而黏粒含量增加将会导致黄土最大剪应力和最大阻尼比发生结构性变化;文少杰等^[16]利用英国 GDS 双向动态三轴试验研究动剪切模量和动阻尼比随着循环次数的变化规律;王燕^[17]根据各向等压固结试验研究黄土强度与变形特性的规律。M. T. Yilmaz 等^[18]通过对土耳其震陷灾害的调查,针对各向异性固结天然土样进行震陷试验,得到该地区土体的震陷特性。Qiu^[19]通过微观结构特征、动三轴试验和爆破振动原位模拟试验对黄土震陷性进行验证。Li^[20]采用 OpenSees 数值模拟方法进行非线性动力有限元分析评价了地震动对软土地地震沉降的影响。Wang 等^[21]基于动三轴试验和 SEM 细观结构试验,研究典型震陷性黄土的细观结构变形特征,发现通过添加粉煤灰的方式可以有效减小黄土地基的震陷量。目前,关于渭北地区的原状黄土动弹性模量和阻尼比的研究相对较少,难以提供可靠的动变形分析参数,对输水管道工程在黄土场地均匀震陷的问题缺乏系统性分析和描述^[22-24]。

文中选取渭北地区的原状黄土作为研究对象,在动三轴试验的基础上,系统地研究黄土的动弹性模量、阻尼比、动本构模型参数、残余应变和动强度,综合地进行动力特性分析,为地下空间建设工程地基动力稳定性提供参考。

1 黄土动三轴试验方案及方法

试验所用的三组黄土取自陕西省渭北地区某输水管道北干线三个不同场地,分别为 CLC、DFC 和 SJB,取土深度为 4 m,属于 Q3 黄土,呈黄褐色,黄土的基本参数见表 1 所示。

表 1 原状土的基本物理性质指标

Tab. 1 Basic physical property indicators of undisturbed soil

地点	含水率 $w/\%$	比重 G_s	密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	孔隙比 e	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$
CLC	24.62	2.7	1.54	1.18	23.5	38.7
DFC	22.71	2.71	1.6	1.08	23	36.5
SJB	10.1	2.7	1.36	1.19	21.7	35.9

由于 SJB 取土地位于黄土塬上,含水率较低,土质较硬,利用环刀法测得平均天然干密度,截取土样,称重计算密度为 $1.5 g/cm^3$,平均比重为

2.7,此次试验使用 TYS-20 型微机控制电液伺服土动三轴试验机,主要组成包括主机、动力控制系统、静力控制系统、量测系统、数据采集处理

系统等, 如图 1 所示。



图 1 TYS-20 型微机控制电液伺服土动三轴试验机
Fig. 1 TYS-20 microprocessor controlled electrohydraulic servo soil dynamic triaxial testing machine

1.1 试样制备

试验选用黄土取自陕西省渭北地区原状黄土, 首先通过挖土机挖取 4 m 深度, 取完后整块用塑料袋封住, 以防止黄土中的水分流失而影响试验结果; 其次放在较为潮湿且不通风的地下室, 待到需要试验时再快速取出进行制样; 最后将取回来的黄土在制样器中固定制成尺寸为 39.1 mm×80 mm 的实心圆柱试样, 用刮土刀将土的表面修整光滑, 用保鲜膜将已经制成的试样包裹起来, 贴上试样基本参数标签, 放在养护缸中养护 10 d 后(养护条件为相对湿度≥95%、温度 20±2 ℃), 即可用于试验, 试样制备过程见图 2。

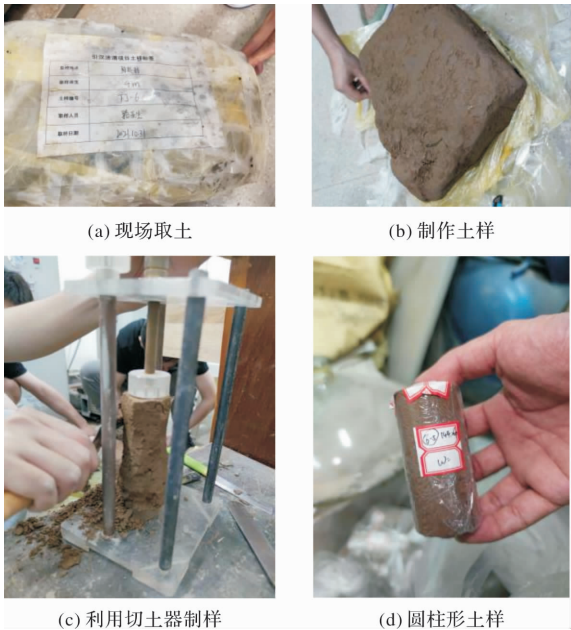


图 2 试样制备过程
Fig. 2 Sample preparation process

1.2 试验方案与步骤

通过动三轴试验分析非饱和原状黄土在持续动应力荷载作用下动应变随循环次数变化的规律及围压、含水率对非饱和原状黄土动力特性的影

响, 试验方案细节见表 2 所示。试验具体操作依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019), 此试验采取固结不排水振动试验条件(CU), 逐级加载前对试样进行等向固结, 先对土样施加 20 kPa 的压力, 再逐级施加均等围压 σ_1 和轴向压力 σ_3 , 用来模拟原状土样在地下的受力情况和地质环境, 直到轴压和围压达到预期设定值压力 50、100、200 和 300 kPa, 固结应力比 $K_c=\sigma_3/\sigma_1$ 。在固结不排水条件下, 施加轴向动荷载之前, 需要将试样进行均压固结 2~5 h, 通过将单个圆柱体土样依次逐级递加载动应力的方式, 并持续施加 1.0 Hz 的等幅正弦波荷载, 循环荷载级数分为 10 级, 每级动应力均振动 10 次或者试样产生较大变形为止, 在整个试验过程中对试样的固结压力保持不变, 具体试验过程如图 3 所示。

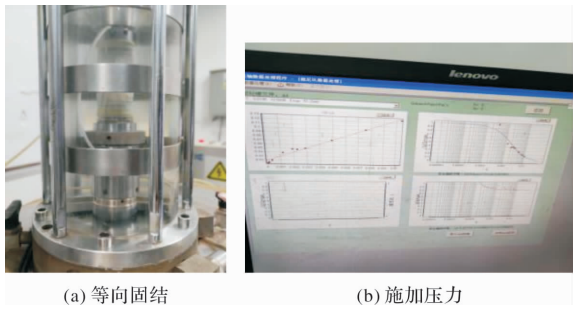


图 3 试验过程
Fig. 3 Test process

表 2 动三轴试验方案(CU)

Tab. 2 Dynamic triaxial test program (CU)		
取样编号	含水率 $w/\%$	固结围压 σ_3/kPa
CLC-1	24. 26	50
CLC-2		100
CLC-3		200
CLC-4		300
DFC-1	22. 71	50
DFC-2		100
DFC-3		200
DFC-4		300
SJB-1	10. 1	50
SJB-2		100
SJB-3		200
SJB-4		300

2 黄土动力特性分析

2.1 黄土的弹塑动本构关系

在动力荷载作用下, 对于黄土动骨干曲线, 是由动应力与动应变之间的关系演变过来的, 其二者的关系也是反应黄土动力变形的重要基础。

一般通过分析动应力-应变关系,可以得到滞回圈,对于理想的弹塑性模型,当应力幅值相同时,滞回圈的形状与大小不因振次而变化。

根据动三轴试验结果,将动应变和动应力的数据异常点删除,然后利用 Origin 软件进行分析拟合,绘制循环荷载作用下渭北地区黄土的 σ_d - ϵ_d 关系曲线,即骨干曲线,表示为在一定的等向应力作用下进行固结,施加不同的轴向应力过程中每一周的滞回圈定点的幅值曲线,如图 4 所示。

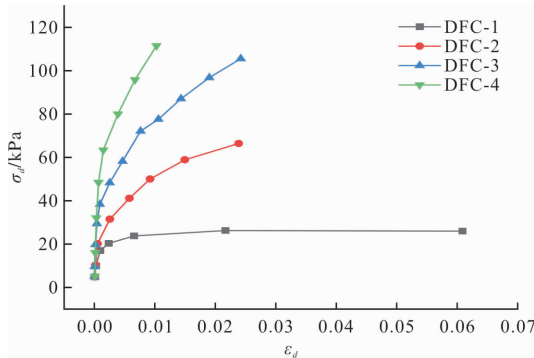


图 4 渭北地区黄土的 σ_d - ϵ_d 关系曲线

Fig. 4 σ_d - ϵ_d relationship curve of loess in Weiwei area

由图 4 可知,随着净围压的增大,曲线向上移动,呈现出应变硬化的趋势。随着循环荷载幅值的增加,动应变全部出现先急剧增长后缓慢增长的趋势。从微观角度来说,原状土土体内部颗粒之间的胶结作用和摩擦强度随着围压增大反而降低,再由于固结应力对土体试样的压力,从而导致土体的相对孔隙率减小,使横截面产生更大的动变形。

分析不同地区对黄土动应力和动应变关系并进行计算。根据动弹性模量的定义式(1),然后计算出循环荷载下渭北原状黄土的动弹性模量以及动弹性模量对应的倒数,对于不同地区的动弹性模量进行比较,将动弹性模量 E_d 进行倒数变换绘制出 $1/E_d$ - ϵ_d 曲线进行拟合得到如图 5 所示。

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_d} \quad (1)$$

由图 5 可知,不同地区黄土的 $1/E_d$ - ϵ_d 曲线均呈非常明显的线性关系,再进行 Origin 软件拟合分析,结果表明,不同饱和黄土的 $1/E_d$ - ϵ_d 曲线均可用以下公式进行拟合,得到式(2)。

$$\frac{1}{E_d} = a + b\epsilon_d \quad (2)$$

相关系数大约为 0.972~0.987。将式(1)代入式(2)得到式(3)。

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{a + b\epsilon_d} \quad (3)$$

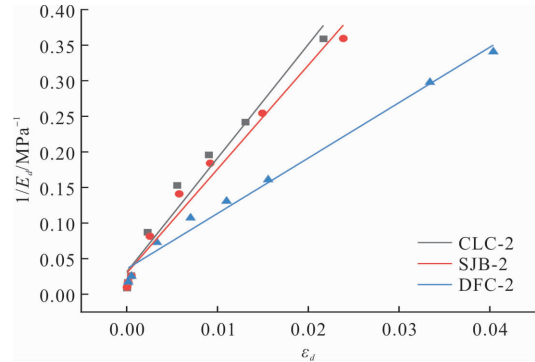


图 5 100 kPa 围压下动应变 $1/E_d$ - ϵ_d 拟合曲线图

Fig. 5 Fitting curve of dynamic strain $1/E_d$ - ϵ_d under different circumferential pressure

表 3 双曲线模型参数

Tab. 3 Parameters of hyperbolic model

试样标号	模型参数		相关系数 R^2
	$a/10^{-6}$	$b/10^{-3}$	
SJB-1	1.776 5	1.557 8	0.987 5
DFC-1	1.481 2	1.460 9	0.977 8
CLC-1	1.506 4	1.598 5	0.985 4
SJB-3	1.802 3	1.490 7	0.972 1
DFC-3	1.437 1	1.450 1	0.980 7
CLC-3	1.484 1	1.635 9	0.982 7

渭北地区黄土的动本构关系动应力幅值和动应变幅值符合 Hardin-Dinevich 双曲线模型,其中 a 、 b 均为模型参数,通过进行数据分析和整合,在土体物理参数、固结压力和模型参数之间关系发现,模型参数与含水率、孔隙比、内摩擦角等物理参数和围压不存在相关性。

2.2 动剪模量随剪应变变化规律

根据试验结果表示,测得 σ_d - ϵ_d 时程曲线,取得曲线上应力循环绘制滞回圈,如图 6 所示,根据滞回圈面积,计算该地区黄土阻尼比 λ ,见式(4)。

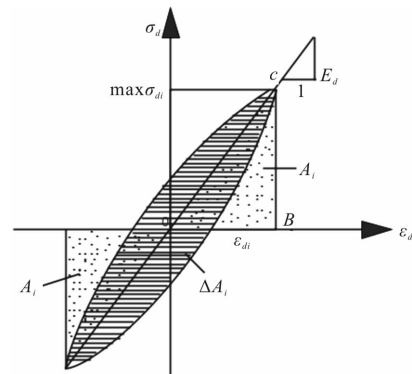


图 6 试验第 i 级记录的滞回圈

Fig. 6 Hysteresis loop of level i record in the test

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta A_i}{A_i} \\ E_{di} = \frac{\sigma_{di}}{\epsilon_{di\max}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{di\max}$ 表示第 i 级压缩方向的最大动应力幅值; ϵ_{di} 表示最大幅值的动应变值; A_i 表示第 i 级荷载作用下的滞回圈 $\triangle OBC$ 的面积; ΔA_i 表示第 i 级荷载作用下的最大滞回圈面积, 其中阻尼比表示受振动加载后动应力衰减情况。

在振动作用下通常视剪切波根据岩体方向向上传播, 因此, 在动力分析中直接可以计算试样土体的动剪应力和动剪应变, 根据理论计算利用经验公式(5)、(6)得到动剪切模量。推导动剪切模量与剪应变的关系为式(8)。

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{\frac{1}{G_0} + \frac{\gamma_d}{\tau_{d\max}}} = \frac{\gamma_d}{a + b\gamma_d} \quad (5)$$

$$\frac{1}{G_d} = \frac{\gamma_d}{\tau_d} = \frac{1}{G_0} + \frac{\gamma_d}{\tau_{d\max}} = a + b\gamma_d, \quad \tau_d = \frac{\sigma_d}{2} \quad (6)$$

在动三轴试验中, 动剪应变表示如式(7)所示。

$$\gamma_d = (1 + \mu)\epsilon_d \quad (7)$$

式中: μ 为泊松比。

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu)} \quad (8)$$

式中: τ_d , γ_d 分别为动剪应力、动剪应变; $\tau_{d\max}$ 为最大动剪应力; G_d 为动剪切模量; G_0 为初始动剪切模量或最大动剪切模量; a , b 为对应直线的截距和斜率, 截距 $a = 1/G_0$, 斜率 $b = 1/\tau_{d\max}$ 。

为了更好地分析渭北地区动剪切模量与动剪应变之间的函数关系, 将三轴试验得出的结果进行拟合分析, 得出 100 kPa 围压下动剪切模量和动剪应变关系如图 7 所示。

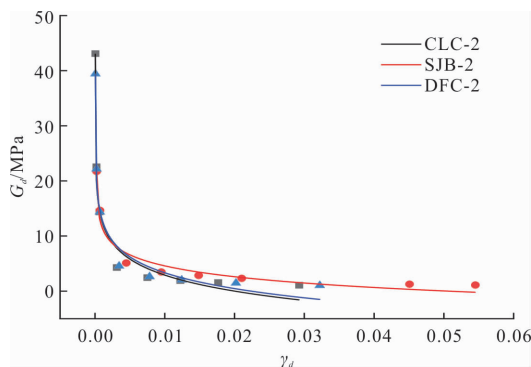


图7 100 kPa 围压下动剪切模量-动剪应变拟合曲线图

Fig. 7 Fitting curves of dynamic shear modulus-dynamic shear strain under different surrounding pressure

由图 7 可知, 动剪切模量和动剪应变呈现非线性关系, 成对数函数关系, 二者之间先呈现急剧

减小然后缓慢减小, 渐渐趋于平衡状态, 根据黄土动力学解释, 当黄土在动三轴试验中, 压力舱施加循环荷载, 当土体随着振动, 渐渐地使土样颗粒之间变得松散, 土体微观内部结构发生破坏, 宏观角度试样土体表面出现裂痕或者碎裂, 土体便发生剪切变形。

在四分之一坐标轴中描绘一个对数衰减模型来诠释渭北地区黄土动力特性, 用对数曲线对动剪切模量与动剪应变之间的关系进行拟合, 其中 A 、 B 、 C 为模型参数。拟合公式为式(8), 不同试样的模型参数及相关系数拟合结果见表 4。

$$G_d = A - B \times \ln(\gamma_d + C) \quad (8)$$

表4 G_d - γ_d 对数曲线拟合结果

Tab. 4 Results of G_d - γ_d logarithmic curve fitting

试样标号	模型参数			相关系数 R^2
	A	B	$C/10^{-7}$	
SJB-1	-8.351 3	2.796 1	-2.189 7	0.961 5
DFC-1	-15.663 5	4.119 2	-0.614 5	0.984 5
CLC-1	-16.332 7	4.173 9	-0.503 4	0.992 1
SJB-2	-29.137 2	7.792 6	-0.295 3	0.931 4
DFC-2	-13.187 5	7.043 4	-1.379 3	0.945 4
CLC-2	-15.045 1	4.326 6	1.034 4	0.945 6

通过式(4)得出动阻尼比, 研究渭北地区相同固结应力下动阻尼比与动剪应变之间的关系如图 8 所示。

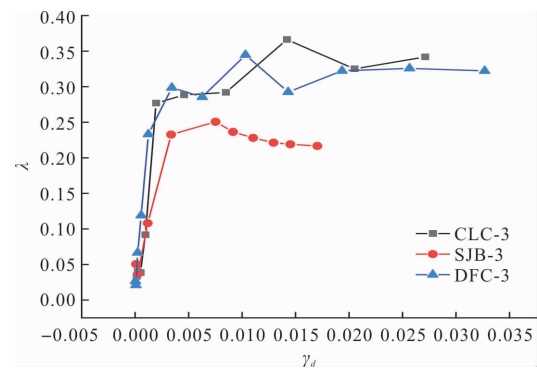


图8 不同地区固结应力下动阻尼比与动剪应变点线图

Fig. 8 Point line plot of dynamic damping ratio versus dynamic shear strain under consolidation stress in different regions

由图 8 可知, 最大阻尼比在 0.2~0.35 之间, 且随着动剪应变的增大, 先开始急剧增长后缓慢增大, 其中存在一个急剧增大的转折点。在相同动剪应变 γ_d 时, 黄土的阻尼比与围压的增长成反比, 即围压越大, 动阻尼比越小。研究表明阻尼比对于围压无明显影响, 也无变化规律, 可能是在一定围压作用下土体内部孔隙被压实至平衡状

态,即便达到平衡后继续增大围压也几乎不会让土体的内部结构发生变化,因此阻尼比变化不明显。

2.3 动强度分析

王兰民^[3]在黄土动力学上定义动强度为在一定的振动作用下,产生某一指定应变所需的动应力,所以黄土动强度与振动前的应力状态有关,因此,为了更好的测试动强度指标 C 和 ϕ 必须模拟振动前的静应力状态。

根据试验中惯用的控制变量法,在测定循环荷载状态下非饱和黄土动强度曲线的基础上,分析各试验参数对黄土动强度特性的影响,根据实际工程需求,本次试验选择应变破坏标准,这一标准是指在动荷载作用下动强度达到某破坏应变时所需的动应力值。在等压固结时,取双幅应变 $2\epsilon_d$ 等于 3% 为破坏应变^[25]。

为了更好地分析该地区在地震中的稳定性及灾害预测,选用 0.2 g 加速度的地震波进行未来可能遭受的地震动时程绘制残余应变的变化情况,如图 9 所示。通过应力应变关系曲线(图 4)得到破坏应变时所需的应力,由应力和对应的围压可得出不同围压下的摩尔圆,如图 10 所示,作出公切线得出动强度指标。

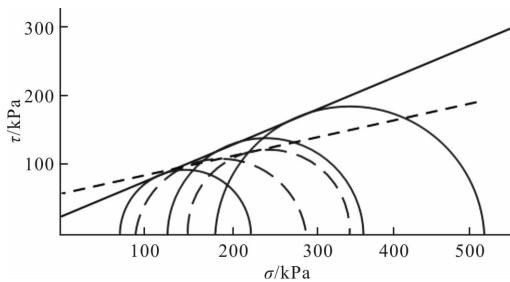


图 9 黄土动强度试验中残余应变的变化情况

Fig. 9 Variation of residual strain in dynamic strength test of loess

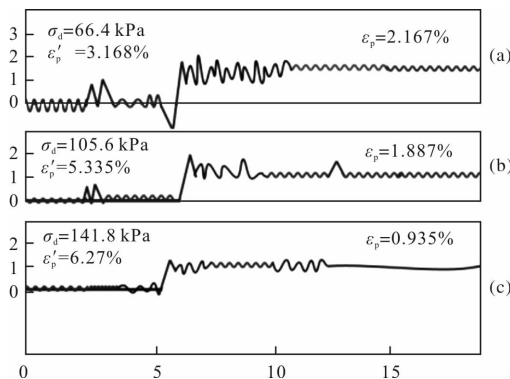


图 10 循环荷载下的动摩尔应力图

Fig. 10 Dynamic molar stress diagram under random seismic loading

表 5 原状土动强度指标

Tab. 5 In-situ soil dynamic strength index

破坏 振次 N_f	含水率 $\omega/\%$	动粘 聚力 C/kPa	动内 摩擦角 $\phi/^\circ$
10	10.1	15.74	17.66
20		17.94	18.65
10	22.71	13.42	16.39
20		15.12	17.42
10	24.62	11.87	15.45
20		13.08	17.01

在分析轴向应力时程时,峰值轴向应力为 66.4 kPa,延伸在三轴压缩方向上,产生的残余应变为 $\epsilon_p = 2.167\%$,由此说明残余应变和土样破坏的现象都是处于三轴压缩的方向上,所以,峰值应力则为试样破坏的关键性因素。

由表 5 可知,从结构的角度来解释,试验中破坏振次的扰动也会对黄土结构造成一定破坏,随着振次增加结构强度降低,动抗剪强度指标会发生明显降低;渭北地区黄土的动强度和动强度指标由于试验的不确定性,导致其结果受到条件的制约,围压对渭北地区黄土的动强度、动黏聚力和动内摩擦角都有不同程度的影响。

2.4 残余应变分析

基于理论计算残余应变值,通过整理动三轴试验数据,分析动应力应变关系。根据土层性质的不同将土体划分为若干土层,设 h_i 为第 i 分层厚度,分层总数为 n ;再根据式(9)计算动剪应力为

$$\tau_{di} = 0.65 \gamma_i h_i \frac{a_{\max}}{g} \times K_d \quad (9)$$

式中: γ_i 为第 i 层黄土的容重, kN/m^3 ; h_i 为第 i 土层中心点到地面的距离, m; a_{\max}/g 为地震系数; K_d 为动应力折减系数,由表 6 可得。

表 6 不同深度黄土动应力折减系数

Tab. 6 Dynamic stress reduction factors for loess at different depths

深度 h/m	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0
K_d	0.975	0.965	0.955	0.935	0.915	0.895	0.850

根据三轴试验得出的残余应变曲线如图 11 所示。

由图 11 可知,在研究黄土动变形时,在固结初始阶段,土体结构未被破坏,绘制出的应力-残余应变曲线存在屈服点,过屈服点之后,残余应变急剧增大,动应力几乎不变,说明土体试样已经破坏;当残余应变在 $0.5\% \sim 1\%$ 时,试样的破

坏应变为屈服应变; 当固结压力增大时, 土体原先的结构已经被破坏, 达到新的稳定状态后, 在循环荷载作用下土体的内部大孔隙受到围压从而产生收缩, 土体宏观上产生了一定的残余变形, 导致土体试样破裂, 土体内部的孔隙被其他土颗粒填补, 此时曲线上的屈服点一般不明显。

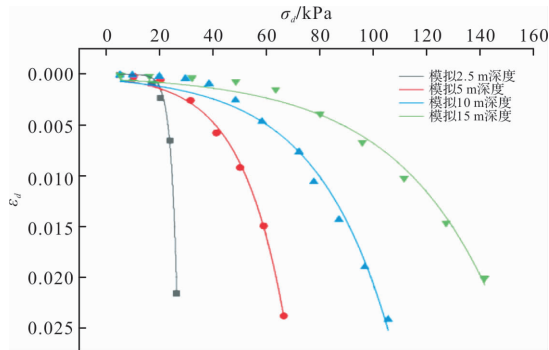


图 11 不同深度下的轴向残余应变

Fig. 11 Axial residual strain at different depths

根据式(10)得出该地区在 0.2 g 地震波下竖向的总震陷量 S , 再计算每一层黄土的震陷系数。理论计算震陷量见表 7 所示。

$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon_{pi} h_i \quad (10)$$

将不同围压模拟为不同深度情况下原状土样地下环境, 便于计算和更好地模拟。

表 7 基于理论计算黄土震陷量

Tab. 7 Calculation of loess plateau seismic subsidence based on theory

地貌单元	模拟深度	拟合参数		震陷系数/%	震陷量/cm
		A	B		
黄土塬	2.5	0.000 49	0.026 7	0.055 9	4.17
	5.0	0.000 01	0.443 1	0.128 9	
	10.0	0.000 42	0.061 0	0.410 3	
	15.0	0.000 59	0.035 7	0.354 9	

基于理论计算的震陷量为 4.16 cm, 根据国家地震局的《震害调查及地震损失评定工作指南》认定为轻微震陷区, 施工经验是在可控的范围内, 由于项目实际是长达数百公里的输水管线, 针对实验结果计算出来的震陷量, 工程中的施工风险基本可以忽略不计, 说明工程中地质情况带来的震陷风险可以有效避免, 为后期对于该地区的地下空间安全性带来有效的参考和提供必要的理论依据。

3 机理分析

黄土主要由土体中的大孔隙和颗粒间隙组成,

而土颗粒本身有很大的刚度, 本身来说是很难发生形变, 不易发生应变, 所以在研究黄土动力特性时, 黄土中大孔隙的变化是黄土动变形的关键因素, 这些孔隙由于土体颗粒的传力刚度和其他颗粒以点接触形式为主, 造成连结强度低, 在静力荷载作用下也会由于自身物理状态的改变而引起土体内部架空空隙破坏, 在动荷载作用下黄土的变形方式与静力状态不同, 土的物理状态和应力状态的共同改变使得其在体积和剪切上变形, 为研究黄土在动荷载作用前、后的微观结构所发生的变化, 利用高倍电子显微镜对土样扫描^[26]。震陷试验前、后孔隙土颗粒单元如图 12 所示。

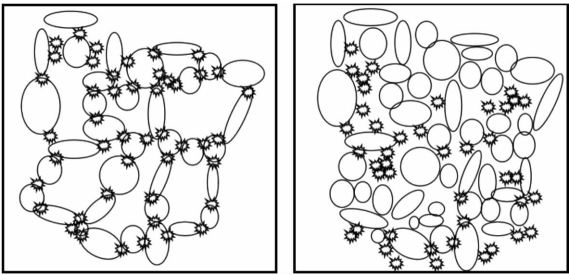


图 12 孔隙-土颗粒单元(试验前与试验后)

Fig. 12 Pore-soil particle unit (pre-test and post-test)

由图 12 可知, 在初始状态下土体无能量交换, 土体颗粒与颗粒之间是架空孔隙气体, 受到动应力作用后, 颗粒骨架重新排列, 集粒分散(集粒为大小不一的粉砂粒颗粒和团聚在一起受力后易分散的颗粒)。根据结果分析可得随着动荷载在土体上的增大, 黄土的架空孔隙结构在应力作用下遭到破坏, 使土体在重力和压力作用下震动变得更加紧密, 黄土的孔隙率变小、体积缩小而产生应力残余变形, 从而提高了黄土的震陷性。

4 结论

以渭北地区的原状黄土作为研究对象, 利用动三轴试验对其动力特性进行试验研究, 结论如下:

(1) 渭北地区原状黄土的动本构关系符合 Hardin-Dinevich 双曲线模型, 随着动应变的增大, 非饱和黄土的动应力呈非线性增长, 动剪切模量随动应变的增大非线性减小; 对不同试验条件下的关系曲线进行分析, 得到动剪切模量的衰减公式;

(2) 渭北地区黄土动剪切模量随动应变增大而减小; 渭北地区黄土动阻尼比随动应变增大而增大, 最大阻尼比主要分布在 0.20~0.35 之间;

(3)该地区黄土动强度和动强度指标受试验条件的影响较大,其中动强度随围压的增大而增大;动黏聚力和动内摩擦角都随振次增大而减小;

(4)随着动荷载增大,黄土的架空孔隙结构在应力作用下遭到破坏,使土体变得更加紧密,黄土的孔隙率变小、体积缩小而产生应力残余变形,从而提高了黄土的震陷性。渭北地区的黄土震陷量为4.16 mm,在可控范围内,属于轻微震陷区,施工安全。

参考文献 References

- [1] CASAGRANDE A, CARRILLO N. Shear failure of anisotropic materials[J]. Boston Society of Civil Engineering Journal(JA), 1944, 31(2): 74-87.
- [2] WHITTLE A J, KAVVADAS M J. Formulation of MIF-E3 constitutive model for over consolidated clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(1): 173-198.
- [3] 王兰民, 石玉成, 刘旭, 等. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003: 85-143.
WANG Lanmin, SHI Yucheng, LIU Xu, et al. Loess dynamics [M]. Beijing: Earthquake Press, 2003: 85-143.
- [4] CHE G, WANG P, WANG Q, et al. Experimental study on the influence of seismic subsidence of loess under bidirectional loading modes[J]. Earthquake Research Advances, 2021, 1(4): 100064.
- [5] KATUWAL S, NORGAARD T, MOLDRUP P, et al. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography[J]. Geoderma, 2015, 237/238: 9-20.
- [6] LIT C, SHAO M A, JIA Y H. Application of X-ray to mography to quantify macropore characteristics of loess soil under two perennial plants[J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(3): 266-275.
- [7] 朱元青, 陈正汉. 原状 Q3 黄土在加载和湿陷过程中细观结构动态演化的 CT 三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1219-1228.
ZHU Yuanqing, CHEN Zhenghan. Experimental study on dynamic evolution of meso-structure of intact Q3 loess during loading and collapse using CT and triaxial apparatus[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2009, 31(8): 1219-1228.
- [8] 王雪艳, 袁一力, 张珊珊. 陕北地区黄土自然高边坡与填方边坡可靠度分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(5): 665-672.
WANG Xueyan, YUAN Yili, ZHANG Shanshan. Reliability analysis of natural high loess slope and fill slope in northern Shaanxi region[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(5): 665-672.
- [9] 刘妮娜, 温凯, 飞菲, 等. 西安近断层区黄土动力特性研究[J/OL]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1-10 [2024-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1295.TU.20240322.1538.004.html>.
LIU Nina, WEN Kai, FEI Fei, et al. Study on dynamic characteristics of loess in Xi'an near fault zone [J/OL]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 1-10 [2024-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1295.TU.20240322.1538.004.html>.
- [10] 李帅, 王家鼎, 李承霖, 等. 循环荷载下黄土的动力特性试验研究及微观结构分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 142-149.
LI Shuai, WANG Jiading, LI Chenglin, et al. Experimental study on dynamic characteristics and micro-structure analysis of loess under cyclic loading[J]. Arid Zone Resources and Environment, 2021, 35(12): 142-149.
- [11] 王峻, 王强, 王杰民. 震后黄土动力学特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 63-67.
WANG Jun, WANG Qiang, WANG Jiemin. Experimental study on dynamic characteristics of loess after earthquake[J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2010, 37(4): 63-67.
- [12] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves [J]. Geotechnical Special Publication, 1972, 98(118): 669-686.
- [13] ISHIHARA K. Modeling of stress-strain relations of soils in cyclic loading[C]//Proc 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya; Publ Rotterdam, 1985.
- [14] 王谦, 李娜, 王平, 等. 甘南地区黄土的动模量与阻尼比特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (S1): 192-197.
WANG Qian, LI Na, WANG Ping, et al. Characterization of dynamic modulus and damping ratio of loess in Gannan area[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 192-197.
- [15] 王谦, 马金莲, 马海萍, 等. 饱和黄土动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1919-1927.

- WANG Qian, MA Jinlian, MA Haiping, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of saturated loess[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(9): 1919-1927.
- [16] 文少杰, 张吾渝, 王鹏. 重复循环荷载作用下原状黄土动力特性试验研究[J]. *地震工程学报*, 2020, 42(6): 1659-1665.
- WEN Shaojie, ZHANG Wuyu, WANG Peng. Experimental study on dynamic characteristics of in-situ loess under repeated cyclic loading[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2020, 42(6): 1659-1665.
- [17] 王燕, 姚仰平, 胡玉定, 等. 不同含水率原状黄土的强度与变形特性试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 54(3): 325-330.
- WANG Yan, YAO Yangping, HU Yuding, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of primary loess with different water content [J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2022, 54(3): 325-330.
- [18] YILMAZ M T, PEKCAN O, BAKIR B S. Undrained cyclic shear and deformation behavior of silt-clay mixtures of Adapazan, Turkey [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(7): 22-27.
- [19] 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: 1909-1935.
- [20] LI Ping, GU Junru, LIU Yingci, et al. The study of soft soil seismic subsidence based on the 3D OpenSees model [J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2022, 9(1): 1-11.
- [21] WANG Ping, XU Shuya, SHAO Shengjun, et al. Mesoscopic characteristics and performance evaluation of loess treated by different anti-seismic subsidence technologies [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 9: 1423-1426.
- [22] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(2): 201-272.
- CHEN Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(2): 201-272.
- [23] CHEN Huie, SHAO Wenchong, JIANG Yaling. Dynamic characteristics of Xianyang loess based on microscopic analysis: A quantitative evaluation [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(10): 8247-8263.
- [24] 姚志华, 陈正汉, 李加贵, 等. 基于 CT 技术的原状黄土细观结构动态演化特征 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 134-142.
- YAO Zhihua, CHEN Zhenghan, LI Jiagui, et al. Meso-structure dynamic evolution characteristic of undisturbed loess based on CT technology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017, 33(13): 134-142.
- [25] LU Tuo, TANG Yaming, TIE Yongbo, et al. Fractal analysis and permeability evaluation of micro-macro pores in loess based on mercury intrusion tests [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics Engineering)*, 2023, 24(7): 584-596.

(编辑 李睿奇)