

饱和重塑黄土动力反应的数值模拟

刘健, 廖红建, 李杭州

(西安交通大学土木工程系, 710049, 西安)

摘要: 将具有粉质黏性的马兰黄土重塑后制成饱和试样, 进行了一系列的固结不排水动三轴剪切试验, 得到不同动应力幅值下的应力应变曲线. 以双曲线型骨干曲线为基础, 以动态骨干曲线假设为条件, 推导了复杂动荷载下用轴向动应力应变表示的卸载、再加载曲线方程. 从应力应变曲线和能量消耗两方面对固结不排水动三轴试验进行了数值模拟分析, 并与试验结果进行比较, 结果表明: 当动应力幅值与固结围压之比在一定范围内时, 两者的阻尼比接近; 当动应力幅值较大时, 两者的卸载曲线较为一致. 提出的数值方法能较好地模拟重塑饱和马兰黄土的固结不排水动力反应, 可为马兰黄土地区的土动力反应分析提供参考.

关键词: 马兰黄土; 动力反应; 动三轴试验; 数值模拟

中图分类号: TU 435 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0101-05

Numerical Simulation on Dynamic Response of Saturated Remolded Loess Soil

LIU Jian, LIAO Hongjian, LI Hangzhou

(Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Saturated soil specimens made of remolded silty clay (malan loess) were tested by undrained dynamic triaxial tests. The stress-strain curves with individual dynamic stress amplitudes were plotted. Based on the hyperbolic backbone curve hypothesis and dynamic backbone curve hypothesis, the equation of unloading and reloading curve was deduced and then the dynamic response of specimens was calculated. The calculated hysteretic loop and dissipated energy were compared with the tests. It is found that the calculated damping ratios agree with the tests as the ratio of dynamic stress amplitude to confining pressure is limited within a certain range, and the calculated unloading curves match test results well under larger dynamic stress.

Keywords: malan loess; dynamic response; dynamic triaxial test; numerical simulation

土动力学的研究可以追溯到 20 世纪初^[1]. 早期的研究主要以线弹性理论为前提、以解析方法为手段来解释线弹性范围内土体动力反应的相关规律. 为了解决非线性范围内的土体动力反应问题, 人们进行了不断的探索^[2]. 随着研究的深入, 对试验方法和数值分析技术的要求也越来越高, 这不仅促进了土动力试验系统的研发和各类土动力试验仪器与试验方法的改进, 使得土体动力反应的试验研究不断发展, 而且从 20 世纪 70 年代以来, 由于计算机技

术和有限元数值分析技术的发展, 使得复杂动荷载作用下的土动力反应分析成为可能. 在土体动力反应的数值分析中, 合理地确定土体本构模型是使计算结果反映实际的关键之一. 但是, 由于不同类型、不同受力条件下土的物理力学性质千差万别, 要建立统一的本构模型非常困难, 因此目前仍然需要针对不同类型的土体建立相应的本构模型.

黄土在世界范围内广泛分布^[3]. 在中国西北地区, 大量的城镇建筑在这种土体之上, 同时该地区又

是地震频发区,历史上曾经发生过多地地震,造成了巨大的损失^[4].因此,针对中国西北地区的黄土进行土体动力反应分析非常有意义.本文对饱和重塑马兰黄土进行了一系列的固结不排水动三轴试验,得到了不同动应力幅值下土体的反应;采用双曲线型骨干曲线和动态骨干曲线假设^[5-6],推导了复杂动荷载下的卸载、再加载曲线方程式,并进行了数值模拟对比分析,以探讨本文方法的可行性.

1 试验研究

1.1 试样及试验条件

试验所用的土体均取自陕西省西安市南郊大学城施工现场,取土深度为2.0~3.0 m,属于马兰黄土.土样的天然密度为1.986 g/cm³,天然含水率(质量分数)为19.3%,塑限为20.8%,液限为34.1%.将黄土重塑消除湿陷性后制备成高为8.0 cm、直径为3.91 cm的饱和试样,干密度控制为1.666 g/cm³,进行抽气饱和.

试验采用 DDS-70 型应力控制式动三轴试验仪.施加动荷载之前将试样进行排水固结,固结比取为1.固结完成后,进行不排水动三轴试验.轴向最大动应力幅值取固结围压的50%,按照等差方式分10级施加,每级荷载进行10次加卸载循环,加载频率取为1 Hz.轴向动应力的施加过程如图1所示.

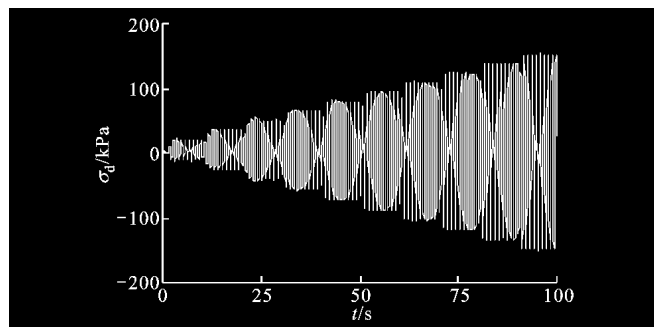


图1 轴向动应力施加过程

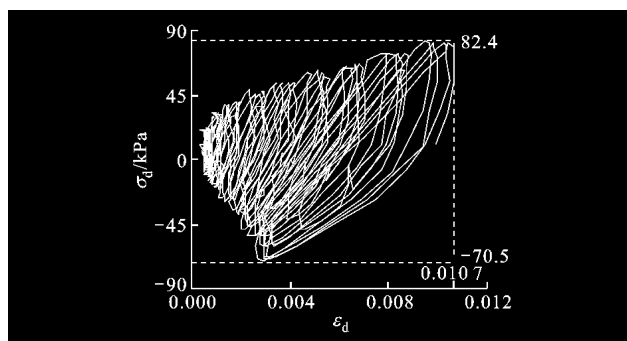
1.2 动应力应变试验结果

本文分别在3种不同的等向围压(152.613、249.820和311.059 kPa)固结下进行动三轴试验,得到的动应力应变曲线如图2所示.由图可见,滞回圈明显右移,即动荷载下土体产生了明显的累积应变.由于轴向最大动应力幅值取固结围压的50%,分10级施加,故围压越大,轴向动应力就越大,累积应变也越大,但累积应变的增加幅度减小.

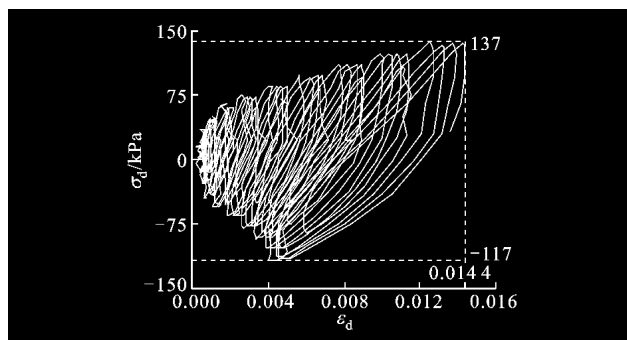
2 数值分析

2.1 骨干曲线方程

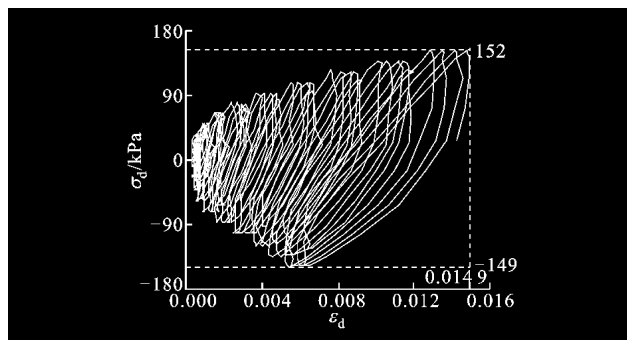
将试验得到的排除累积应变之后的滞回圈的顶



(a) 固结围压 152.613 kPa



(b) 固结围压 249.820 kPa



(c) 固结围压 311.059 kPa

图2 试验得到的应力应变曲线

点相连,可得到骨干曲线,由于其与双曲线型骨干曲线^[5,7]拟合较好,故采用双曲线型骨干曲线.分析中为了便于直接运用试验结果,采用直接测得的轴向动应力和动应变进行分析.骨干曲线方程为

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{a + b |\epsilon_d|} \quad (1)$$

式中: σ_d 为动应力; ϵ_d 为动应变; a 、 b 为试验参数,其中 a 为土体最大动弹性模量的倒数, b 为土体极限动应力的倒数.

根据试验结果,得到饱和重塑马兰黄土骨干曲线的试验参数,如表1所示.

表1 饱和重塑马兰黄土骨干曲线参数

试样	a/Pa^{-1}	b/Pa^{-1}	固结围压/kPa
S150	$1.323\ 740 \times 10^{-8}$	$9.933\ 154 \times 10^{-6}$	152.613
S250	$8.694\ 890 \times 10^{-9}$	$6.221\ 109 \times 10^{-6}$	249.820
S300	$7.388\ 785 \times 10^{-9}$	$4.975\ 198 \times 10^{-6}$	311.059

2.2 卸载及再加载曲线方程

在等幅往返动荷载作用下,结合双曲线型骨干曲线^[5],采用 Masing 二倍准则来确定卸载、再加载曲线的走向,方程如下

$$\sigma_d - \sigma_0 = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_0}{a + b |\varepsilon_d - \varepsilon_0| / 2} \quad (2)$$

或
$$\varepsilon_d - \varepsilon_0 = \frac{a(\sigma_d - \sigma_0)}{1 - b |\sigma_d - \sigma_0| / 2} \quad (3)$$

式中: σ_0 、 ε_0 分别为卸载或再加载开始时的动应力和动应变。

在不等幅复杂动荷载下,式(2)、式(3)已不再能描述卸载、再加载曲线。这里以动态骨干曲线假设为条件^[6],推导出用轴向动应力和动应变表达的卸载、再加载曲线方程

$$\sigma_d - \sigma_0 = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_0}{a + b |\varepsilon_d - \varepsilon_0| / n} \quad (4)$$

或
$$\varepsilon_d - \varepsilon_0 = \frac{a(\sigma_d - \sigma_0)}{1 - b |\sigma_d - \sigma_0| / n} \quad (5)$$

这里 n 根据动态骨干曲线假设可推导为

$$n = b / \left(\frac{1}{\sigma_{d,\max} - \sigma_0} - \frac{a}{\varepsilon_{d,\max} - \varepsilon_0} \right) \quad (6)$$

式中: $\sigma_{d,\max}$ 、 $\varepsilon_{d,\max}$ 为应力应变历史上的绝对应力最大值和绝对应变最大值。

当考虑等幅往返动荷载作用时,式(4)和式(5)同式(2)和式(3)。

3 计算结果考察

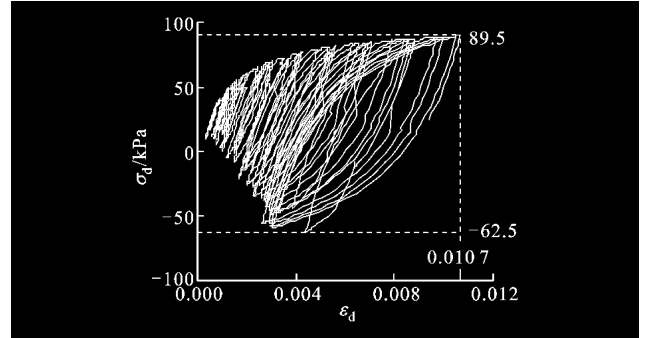
为了验证上述计算方法的适用性,下面分别从根据实测动应变计算动应力和根据实测动应力计算动应变两方面进行数值模拟分析。

3.1 由动应变计算动应力

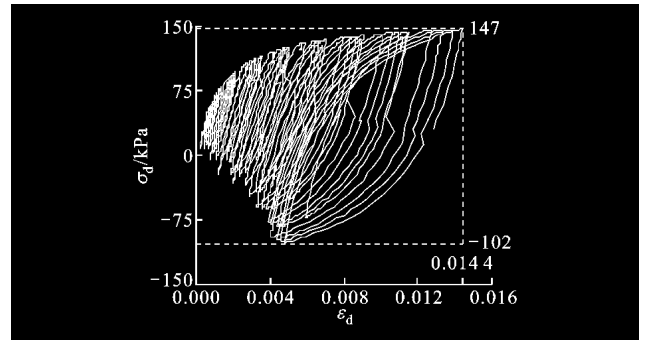
将不同围压下计算得到的动应力应变曲线与试验结果绘于图3中,与图2对比可以看出,计算结果与试验结果变化趋势一致,而轴向动应力的计算值比试验结果略偏大。这是由于采用动态骨干曲线假设时,认为卸载及再加载曲线走向所指向的点始终在骨干曲线上,因此在利用含有累积应变的动应变计算动应力时,应力会出现偏大现象。通过计算,验证了运用上述卸载、再加载曲线方程可以模拟饱和黄土固结不排水动三轴试验。

由于轴向动应力 σ_d 的最大幅值取固结围压的50%,分10级施加,即按 σ_d 分别取围压的5%、10%、15%、……、40%、45%、50%来施加,因此对不同固结围压、各级动应力振幅下滞回曲线的计算与试验结果也进行了比较。图4选取了固结围压为

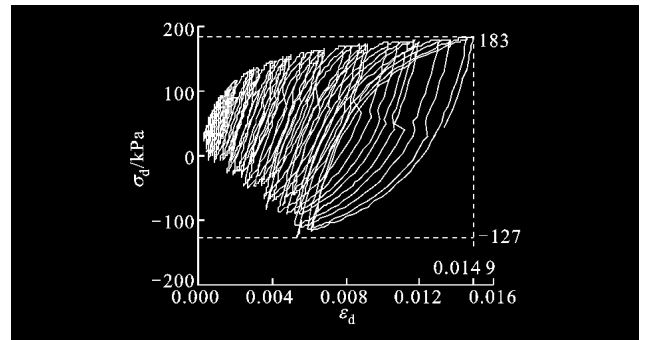
249.820 kPa 时,35%、40%、45%三级动应力下的滞回曲线计算结果与试验结果。其他固结围压下的结果具有相同的变化规律。



(a) 固结围压 152.613 kPa



(b) 固结围压 249.820 kPa



(c) 固结围压 311.059 kPa

图3 由动应变计算的动应力

由图4可以看出:当动应力幅值 σ_d 小于等于固结围压的35%时,计算的滞回曲线所包围的面积小于试验曲线所包围的面积,表明计算出的能量消耗小于实际的能量消耗,即计算的阻尼比偏小;当 σ_d 大于等于固结围压的45%时,计算的滞回曲线所包围的面积大于试验曲线所包围的面积,表明计算出的能量消耗大于实际的能量消耗,即计算的阻尼比偏大;当 σ_d 在固结围压的40%附近时,滞回曲线的计算结果与试验结果大体相等。因此,当实际动应力幅值与固结围压之比在一定的范围内时,计算结果与试验结果相近,此时数值分析的计算结果具有实际意义。

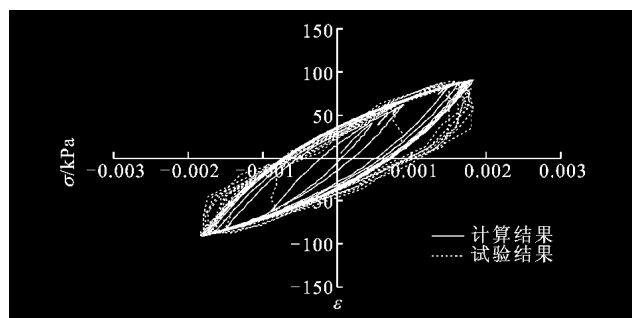
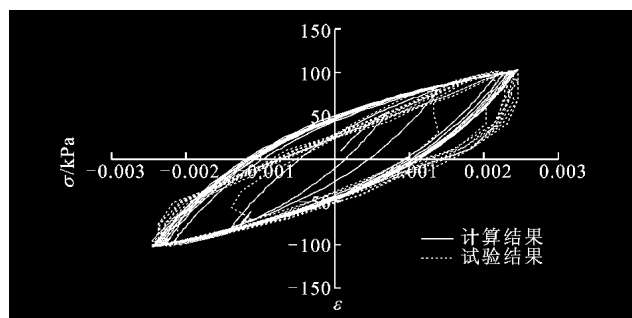
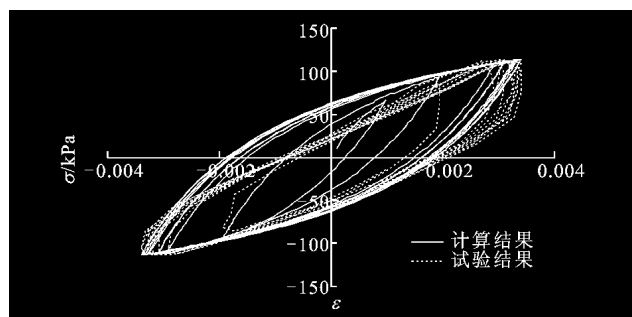
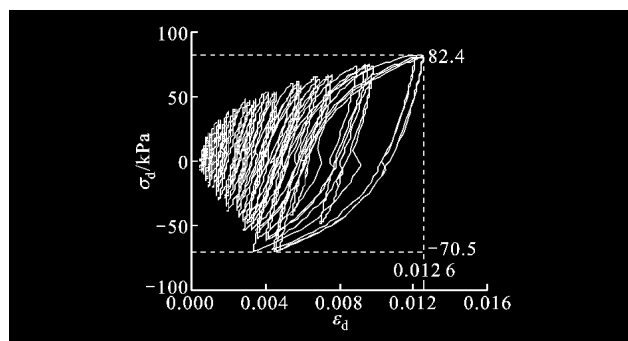
(a) σ_d 为固结围压的 35%(b) σ_d 为固结围压的 40%(c) σ_d 为固结围压的 45%

图4 固结围压为 249.820 kPa 时的滞回曲线

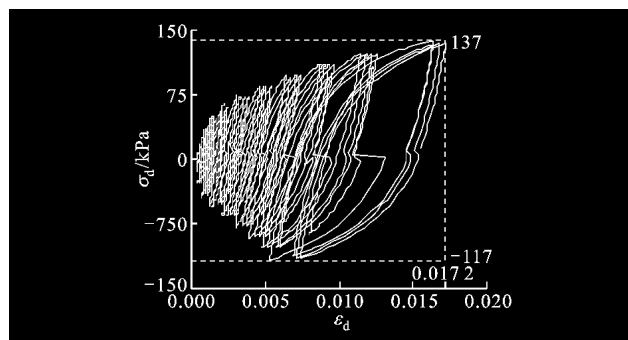
另外,当 σ_d 较大时,由图 4c 可以看出,滞回曲线的卸载曲线计算结果与试验结果较一致,而再加载曲线的计算结果比试验结果偏大。

3.2 由动应力计算动应变

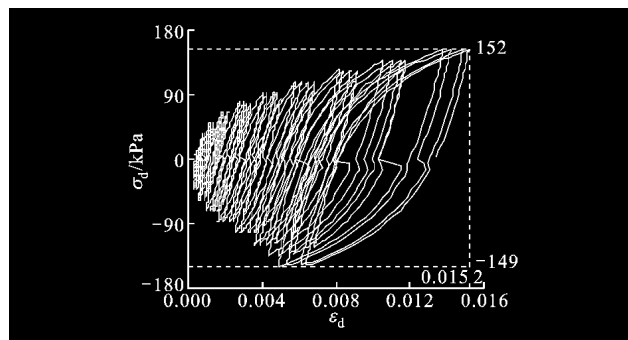
进一步运用上述卸载、再加载曲线方程由动应力计算动应变,可以发现该算法没有完全反映实际累积应变。因此,需在计算中再叠加试验测得的累积应变,结果如图 5 所示。与图 2 对比可以看出,计算结果与试验结果的变化趋势一致,并且随着围压的增大,两者的动应力应变吻合良好,这进一步验证了运用上述卸载、再加载曲线的数值方法模拟饱和黄土固结不排水动三轴试验的可行性。但是在围压较低时,计算结果相对试验结果沿应变轴有整体右移趋势,这说明在动态骨干曲线假设中,体现了一定的累积应变,在此基础上叠加实际累积应变,使得计算值较实际值偏大,不过随着围压的增加,这部分累积应变所占的比例越来越小。



(a) 固结围压 152.613 kPa



(b) 固结围压 249.820 kPa



(c) 固结围压 311.059 kPa

图5 由动应变计算的动应力

取各级动应力振幅条件下滞回曲线的计算结果与试验结果进行比较,可以发现计算结果与试验结果之间的能量消耗关系与上述利用实际动应变计算动应力的情况相同。

4 结 论

本文根据饱和重塑马兰黄土试样的动三轴试验结果,得出了动应力应变曲线,并采用双曲线型骨干曲线方程和动态骨干曲线假设,推导了复杂动荷载下用轴向动应力应变表示的卸载、再加载曲线方程。通过对试验结果进行模拟计算,得到以下结论。

(1)无论是由动应变计算动应力还是由动应力计算动应变,对于运用本文的数值方法所计算的饱和重塑黄土动应力应变曲线,其变化趋势与试验结果一致且吻合较好,验证了本文方法的可行性。

(2)当由试验得到的动应变计算动应力时,计算结果较试验结果略偏大,这是由于累积应变的影响所致;当由试验得到的动应力计算动应变时,在计算中叠加了试验测得的累积应变所获得的结果与试验结果相近.因此,在实际的数值模拟中应充分考虑累积应变的影响.

(3)无论是由实测动应变计算动应力还是由实测动应力计算动应变,在各级动应力幅值 σ_d 下计算的滞回曲线与试验结果的对比均得到相同的结果:随着 σ_d 的增大,滞回圈的计算卸载曲线与试验结果较一致,而再加载曲线比试验结果偏大;当 σ_d 小于等于固结围压的35%时,计算的阻尼比偏小;当 σ_d 大于等于固结围压的45%时,计算的阻尼比偏大;当 σ_d 在固结围压的40%附近时,两者的阻尼比几乎相等.可见,当动应力幅值与固结围压之比在一定的范围内时,计算结果与试验结果相近,此时数值分析的计算结果具有实际意义.

参考文献:

- [1] LAMB H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1904, 203: 1-42.
- [2] IDRIS I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94 (SM4): 1003-1031.
- [3] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [4] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [5] HARDIN B O, DMEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, 98 (SM6): 603-624.
- [6] 李小军, 廖振鹏, 张克绪. 考虑阻尼拟合的动态骨架曲线函数式[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(1): 30-35.
- LI Xiaojun, LIAO Zhenpeng, ZHANG Kexu. A functional formula of dynamic skeleton curve taking account of damping effect [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(1): 30-35.
- [7] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

(编辑 葛赵青)