

河北承德黄土动剪切模量与阻尼比试验研究^{*}

魏连雨¹, 李 慧¹, 董立颖¹, 冯 雷²

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401; 2. 天津城建设计院, 天津 300122)

摘要: 为研究河北承德黄土的动力学特性, 开展了该地区路基土的室内动三轴试验, 得出了承德黄土动剪切模量和动阻尼比的变化规律。结果表明: 动剪切模量随干密度的增加和含水率的降低而增大, 干密度越大, 最大动剪切模量随含水率增加而降低的幅度越大; 含水率越高, 最大动剪切模量随干密度增加而增大的幅度越小。阻尼比随动剪应变增加而增大, 可用本文推荐的公式进行拟合, 拟合效果良好。相同条件下, 承德黄土的最大动剪切模量远小于中西部地区, 阻尼比增长速率大于中西部地区。

关键词: 河北承德; 黄土; 动三轴试验; 动剪切模量; 阻尼比; 含水率; 干密度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)03-0513-06

0 引言

黄土作为一种特殊土, 在我国分布较广, 不同地区的黄土由于地理、气候等条件的不同, 力学性质也有较大差异。以往对黄土的研究多集中于静力学特性, 但随着研究的不断深入, 地震、行车荷载、工程动荷载等对黄土造成的影响和破坏使人们开始更多地关注其动力学特性。

在我国, 有大量地震造成严重人员伤亡和财产损失的案例(郭路杰等, 2014; 白仙富等, 2015)。土的动剪切模量和阻尼比在地震分析和场地安全评价中有重要作用(Hardin, Drnevich, 1972; 齐剑峰等, 2008)。另外, 在一些动力学模拟的软件中, 动剪切模量作为表征土动力特性的变量是建立模型必不可少的参数。因此, 确定它们的数值范围对保证工程的安全性意义重大。

目前, 关于土的动剪切模量和阻尼比的研究有很多(何昌荣, 1997; 孙静, 袁晓铭, 2003; 陈存礼等, 2007; 孙仲林等, 2012), 骆亚生和田堪良(2005)对不同湿度下的陕西非饱和黄土进行了动扭剪试验, 结果显示非饱和黄土的动剪切模量与其密实程度有关, 黄土的阻尼比受围压、固结比、干密度、含水率等因素的影响。王志杰等(2010)以中西部三个地区的黄土为研究对象进行动扭剪三轴试验, 结果显示含水率越小, 固结压力越大, 动剪切模量越大; 同时得到了动剪

切模量随动剪应变的变化规律、黄土在相同含水率和固结应力下初始动剪切模量以及阻尼比在空间分布上的规律性。李铮等(2014)通过对山西地区黄土进行共振柱与动三轴试验, 获得了较大应变范围内动剪切模量与阻尼比的试验数据, 结果显示固结压力显著影响着动剪切模量, 固结压力越大, 动剪切模量越大, 采用修正的 Hardin 模型对动剪切模量进行拟合, 效果良好, 并确立了经验公式。

由于地理位置不同, 成因复杂, 目前针对黄土的动力研究基本都是限定在某一区域进行的, 且大多是针对地震多发的中西部地区, 对于河北黄土的关注较少, 因此本文针对河北承德的黄土进行室内动三轴试验, 研究其动剪切模量与阻尼比的特性, 为该地区黄土的动力学分析提供参数, 为防灾减灾工作和工程建设等提供参考。

1 试验方法

1.1 试样制备及试验设计

试验黄土为承德平泉地区的路基土, 试样为扰动样。对所取黄土进行击实及液塑限测定等试验, 得到其物理性质指标, 结果如表1所示。

本次设计试验组为9组, 围压设为100 kPa, 含水率分别为10%、15%、20%, 干密度分别为1.4 g/cm³、1.6 g/cm³、1.8 g/cm³。

试验所用试样为实心圆柱, 直径39.1 mm, 高

^{*} 收稿日期: 2015-06-02.

基金项目: 河北省交通运输厅科技计划项目(20140629)资助.

度 80 mm。试样制备时, 首先将黄土过 2 mm 筛, 用烘干法测得原始含水率。然后称取一定质量的黄土, 将其配成试验所要求的含水率, 密闭条件下浸润 24 h, 使其水分均匀分布。根据预设干密度, 称得每个试样需要的一定质量的黄土, 利用

小型千斤顶制样, 该方法克服了传统制样方法的不足, 使试样密度更加均匀, 结构更加稳定。在试样成型后静置 3 ~ 5 分钟, 使其结构相对稳定后将试样脱模, 用保鲜膜包好放入密闭环境备用。

表 1 承德黄土物理性质指标
Tab. 1 Physical property indexes of the loess of Chengde

比重 G_s	最大干密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	最优含水率 ω (%)	液限 ω_L (%)	塑限 ω_p (%)	塑性指数 I_p
2. 71	1. 88	14	29. 5	17. 8	11. 7

1. 2 试验仪器及方法

本次试验所用仪器为微机控制电液伺服动三轴试验机。该仪器由主机、控制器、液压源和测量系统等构成, 随着试验的进行, 试验条件、参数设置和结果由电脑数据采集系统记录并自动存盘。

试验选用波形为正弦波形, 频率设为 1 Hz, 围压设定为 100 kPa。试验采用排水排气固结的方式, 固结比设为 1。在固结过程中观察并记录轴向变形量和孔压, 当 1 h 内轴向变形量小于等于 0. 01 mm 且孔压变化的幅度小于 2 kPa 时, 认为固结完成。接着关闭上下排水阀, 对试样逐级施加动态荷载, 每级振动 8 次, 直到试样发生破坏, 以轴向应变量大于 5% 作为破坏标准。试验时, 设置采样间隔时间为 20 ms, 微机自动在每个循环周期采集 50 个测点进行数据记录。最后, 选择有代表性的周次进行动剪切模量与阻尼比的分析。

2 动剪切模量

土的动剪切模量是指产生单位动应变时所需要的动剪应力, 即动剪应力 τ_d 与动剪应变 γ_d 的比值, 它代表了土体抵抗剪切变形能力的大小 (谢定义, 1988)。

动三轴试验直接测得数据为动态轴向应力和应变 ε_d , 软件处理得到动弹性模量 E_d , 进而可求得动剪应变 γ_d 和动剪切模量 G_d 。换算公式如下:

$$\gamma_d = \varepsilon_d(1 + \mu).$$
 (1)

$$G_d = E_d/2(1 + \mu).$$
 (2)

式中, μ 为土的泊松比, 由于试验用土为不饱和土, 结合土性条件, μ 取为 0. 3。

2. 1 动剪切模量和动剪应变关系

承德黄土动剪切模量和动剪应变的关系如图 1

所示。由曲线可见, 随着动剪应变越来越大, 动剪切模量值不断变小。动荷载刚开始作用时, 动剪应变值较小, 动剪切模量较大, 此时黄土颗粒之间具有联结效果, 土体表现出一种结构性, 能更好地抵抗剪切变形, 所以产生一定的应变需要施加的动应力较大, 也导致动剪切模量值较高; 随着动荷载不断作用, 黄土的结构性消失, 抵抗变形的强度降低, 动剪切模量大幅减小; 当动荷载作用到一定阶段, 动剪切模量减小的幅度越来越小, 土体接近破坏时, 将趋于一个相对稳定的水平。

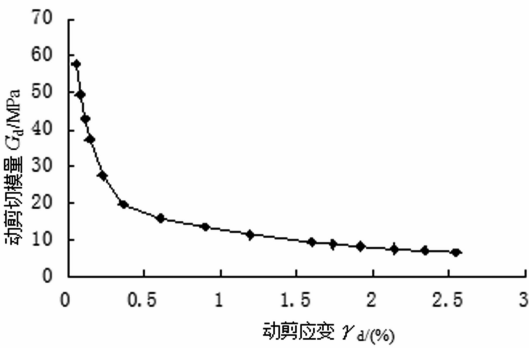


图 1 承德黄土动剪切模量和动剪应变关系
Fig. 1 Curve of relationship between dynamic shear modulus and dynamic shear strain of the loess in chengde

2. 2 含水率对动剪切模量的影响

承德黄土的动剪切模量因含水率的改变而发生显著变化。当围压和干密度相同时, 含水率越大, 其动剪切模量越小, 其影响规律如图 2 所示。这是由于水分对土体组成颗粒间的摩擦力和联结效果起着重要作用。低含水率下, 土体颗粒之间的联结较好、摩擦力大, 因而土体受力时更不易发生变形, 表现为动剪切模量值较大; 高含水率下, 土体因为水的“润滑”作用, 联结效果较差,

不能形成相对稳固的结构,受力时更容易发生蠕动、变形,表现为动剪切模量值较小。

2.3 干密度对动剪切模量的影响

干密度对承德黄土的动剪切模量也会产生显著影响。当围压和含水率相同时,干密度越大,其动剪切模量越大,影响规律如图3所示。这是因为干密度代表土体的压实状态,干密度越大即土的压实度越高,颗粒间接触越充分,咬合能力越强,土体受力时越不易发生变形,即产生一定剪

应变要求施加的外力越大,反映为动剪切模量值越大。

2.4 最大动剪切模量

最大动剪切模量和含水率、干密度都有密切关系。试验结果显示,承德黄土在一定范围内的最大动剪切模量分别与含水率和干密度呈线性关系。含水率一定时,最大动剪切模量随干密度增大而增大;干密度一定时,最大动剪切模量随含水率增大而减小。关系曲线如图4所示。

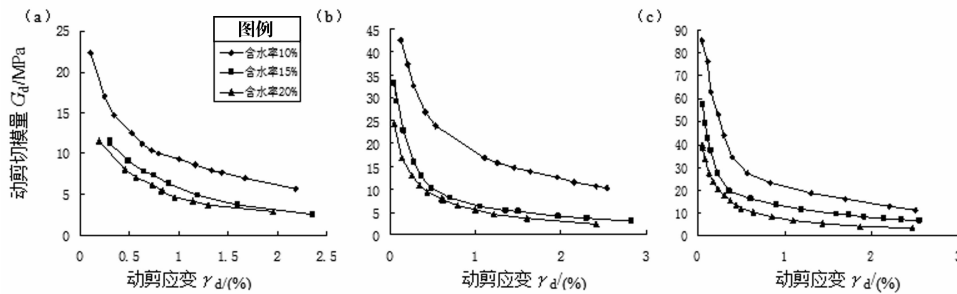


图2 干密度分别为 1.4 g/cm^3 (a)、 1.6 g/cm^3 (b)、 1.8 g/cm^3 (c) 时, 含水率对承德黄土 G_d 的影响规律

Fig. 2 Effects of moisture content on dynamic shear modulus G_d of the loess in Chengde when the dry density is 1.4 g/cm^3 (a), 1.6 g/cm^3 (b), 1.8 g/cm^3 (c)

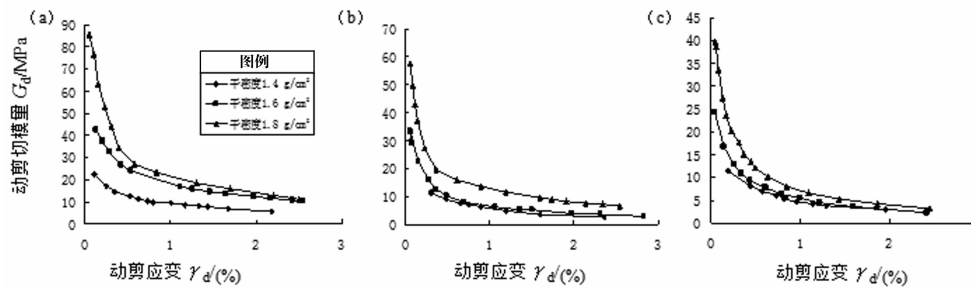


图3 含水率分别为 10% (a)、15% (b)、20% (c) 时, 干密度对承德黄土 G_d 的影响规律

Fig. 3 Effects of dry density on dynamic shear modulus G_d of the loess in Chengde when the moisture content is 10% (a), 15% (b), 20% (c)

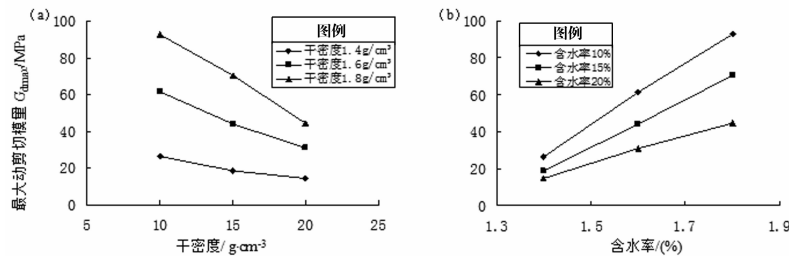


图4 G_{dmax} 变化曲线

(a) 不同含水率下 G_{dmax} 随干密度变化曲线; (b) 不同干密度下 G_{dmax} 随含水率变化曲线

Fig. 4 Variation curves of G_{dmax}

(a) curves of G_{dmax} varied with dry density under different moisture content;

(b) curves of G_{dmax} varied with moisture content under different dry density

由图 4a 可知, 含水率越高, 最大动剪切模量随干密度增加而增长的幅度越小, 即干密度的影响效果越不显著。这是因为水分越多, 土体颗粒间润滑作用越好, 受力时更易发生滑动, 增加相同比例干密度时, 其抗剪切效果增强得越不明显, 因而表现为最大动剪切模量增长幅度越小。由图 4b 可知, 干密度越大, 最大动剪切模量随含水率升高而降低的幅度越大, 即含水率的影响效果越显著。这是因为干密度越大, 土的压实度越高, 增加相同比例的水分, 土体颗粒与水之间的有效接触越充分, 润滑作用越好, 土体抗剪切效果降低得也越明显, 因而表现为最大动剪切模量降低的幅度越大。

3 阻尼比

阻尼比是阻尼系数与临界阻尼系数的比值, 是衡量土体吸收能量的重要尺度 (谢定义, 1988)。土体的阻尼作用主要是土粒间相互滑动时由被称为滞后作用的摩擦效应产生的。数据结果显示, 随着动剪应变的增加, 阻尼比整体呈上升趋势。因为随着动荷载的不断作用, 动剪应变增加, 土体在受力过程中逐渐发生松动, 土粒之间的摩擦机会增多, 因此每个循环周期需消耗更多的能量, 表现为阻尼比增大。阻尼比随动剪应变变化的关系如图 5 所示。

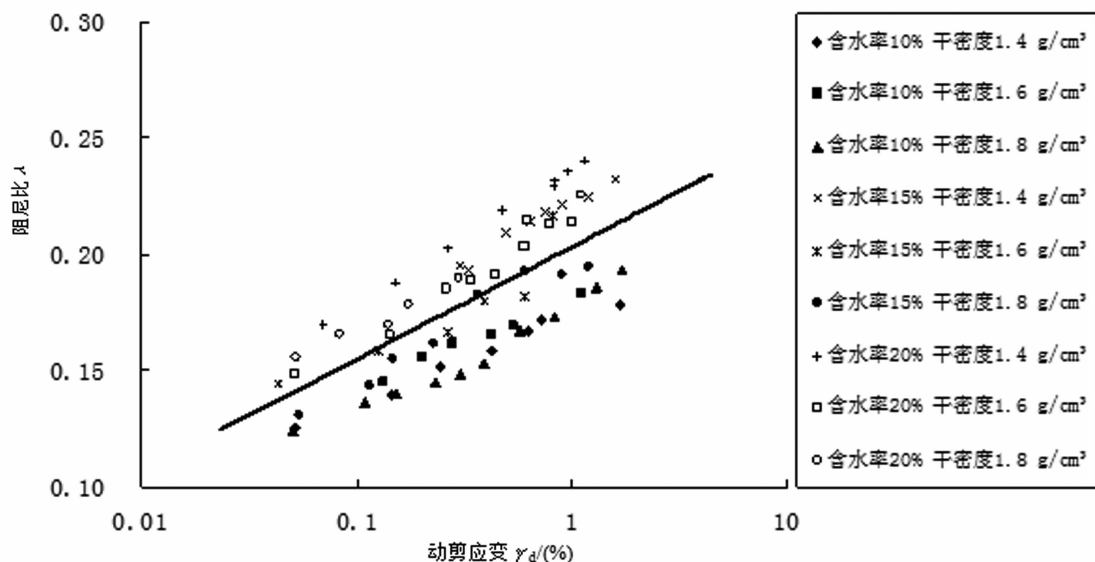


图 5 阻尼比随动剪应变变化散点图

Fig. 5 Scatter plot of damping ratio varied with dynamic shear strain

研究表明, 非饱和黄土的阻尼比随动剪应变的变化在半对数坐标中有良好的线性相关性 (骆亚生, 田堪良, 2005; 王志杰等, 2010), 可按经验公式 $\lambda = a \lg(\lambda_d) + b$ 进行拟合, a , b 为拟合参数。将本次试验数据绘入半对数坐标发现阻尼比与动剪切模量存在较好的线性关系, 利用该公式拟合承德黄土阻尼比与动剪应变 γ_d 的关系:

$$\lambda = 0.048 \lg(\gamma_d) + 0.203 \quad (3)$$

拟合相关系数 $R^2 = 0.859$, 表明拟合效果较好。所以对于河北承德黄土的阻尼比与动剪应变关系可以使用该经验公式进行拟合, 拟合参数 $a = 0.048 \ 32$, $b = 0.203 \ 2$ 。该结果可为承德地区黄土的动力学分析提供参考。

4 河北承德黄土与中西部地区黄土的差异

河北承德黄土的动剪切模量和阻尼比在随剪应变变化以及受含水率影响的趋势方面与中西部地区黄土基本一致, 但在数值范围和具体变化规律上表现出了较大的差异。

4.1 动剪切模量的差异

分析实验数据可知, 当固结围压为 100 kPa, 干密度为 1.4 g/cm^3 , 含水率在 10% ~ 20% 之间变化时, 试验所得河北承德黄土最大动剪切模量的值在 18 ~ 28 MPa 之间; 而中西部地区以杨凌、洛

川、兰州为例，最大动剪切模量值的范围大约为30~65 MPa（王志杰等，2010）。由此可知，相同条件下河北承德黄土的动剪切模量远小于中西部地区黄土的动剪切模量。造成这种差异的原因主要是两个地区黄土的成因不同，河北承德黄土的可溶性盐的含量远远低于中西部地区，而可溶性盐正是影响黄土胶结作用的关键因素，可溶性盐含量越高，土体的胶结作用越好，抵抗变形的能力越强，因而土体的动剪切模量值越大。

4.2 阻尼比的差异

中西部三个地区和河北承德地区阻尼比随动剪应变变化的拟合经验公式中的拟合参数 a 值见表2（王志杰，2010）。比较可得，河北承德黄土的阻尼比随剪应变增长的速率比中西部三个地区的都大，这说明振动能量在河北承德地区的损失速率大于中西部地区。这一结论可为地震区划研究提供参考。

表2 不同地区阻尼比与动剪应变拟合参数

Tab. 2 Regression parameters of damping ratios and dynamic shear strain in different area

地区	兰州	洛川	杨凌	承德
拟合参数 a	0.034 4	0.032 3	0.026 6	0.048 3

5 结论

本文通过对河北承德黄土设置不同的含水率和干密度条件来进行动三轴试验，获得其不同条件下较大应变范围内的动剪切模量和阻尼比，分析得出其变化规律。

（1）河北承德黄土的动剪切模量随动剪应变增加而减小，且减小的幅度逐渐降低直至趋于某一稳定水平；含水率和干密度对动剪切模量影响显著，干密度越大，含水率越低，承德黄土的动剪切模量越大。

（2）河北承德黄土最大动剪切模量的变化规律受含水率和干密度的共同影响。含水率越高，最大动剪切模量随干密度增加而增长的幅度越小；干密度越大，最大动剪切模量随含水率增加而降低的幅度越大。

（3）河北承德黄土的阻尼比整体上随着动剪应变的增加而增大，且可用本文推荐的公式拟合，拟合效果良好。

（4）通过对比可知，相同条件下河北承德黄土的最大动剪切模量远小于中西部地区，阻尼比增长速率即能量损失速率大于中西部地区。

参考文献：

- 白仙富,戴雨芾,余庆坤等. 2015. 地震滑坡危险性评估模型及初步应用[J]. 地震研究, 38(2): 301 - 312.
- 陈存礼,杨鹏,何军芳. 2007. 饱和击实黄土的动力特性研究[J]. 岩土力学, 28(8): 1551 - 1556.
- 郭路杰,蒋长胜,韩立波. 2014. 2014年云南鲁甸6.5级地震序列参数的早期特征[J]. 地震研究, 37(4): 503 - 507.
- 何昌荣. 1997. 动模量和阻尼的动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 19(2): 39 - 48.
- 骆亚生,田堪良. 2005. 非饱和黄土的动剪切模量与阻尼比[J]. 水力学报, 36(7): 830 - 834.
- 李铮,李宏恩,何勇军. 2014. 山西黄土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 34(4): 523 - 528.
- 齐剑峰,栾茂田,杨庆等. 2008. 饱和黏土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土工程学报, 30(4): 518 - 523.
- 孙静,袁晓铭. 2003. 土的动模量和阻尼比研究述评[J]. 世界地震工程, 19(1): 88 - 95.
- 孙仲林,党进谦,樊恒辉等. 2012. 分散性土动剪切模量影响因素的试验研究[J]. 岩土力学, 33(12): 3669 - 3673.
- 王志杰,骆亚生,王瑞瑞等. 2010. 不同地区原状黄土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 32(9): 1464 - 1469.
- 谢定义. 1988. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社.
- Hardin B O, Drnevich V P. 1972. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 98(6): 603 - 624.

Study on Experiment of Dynamic Shear Module and Damping Ration of Loess in Chengde of Hebei

WEI Lianyu¹, LI Hui¹, DONG Liying¹, FENG Lei¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(2. Tianjin Urban Construction Design Institute, Tianjin 300122, China)

Abstract

In order to study the dynamic characteristic of loess in Chengde of Hebei, we performed the dynamic triaxial test on subgrade loess, and obtained the variation laws of dynamic shear modulus and damping ration of loess in Chengde. The results show that the dynamic shear modulus increases with the increase of dry density and the decrease of moisture content. The larger the dry density is, the decrease amplitude of maximum dynamic shear modulus is larger with increase of moisture content. The higher the moisture content is, the increase amplitude of maximum dynamic shear modulus is smaller with increase of moisture content. The damping ratios increase with the increase of dynamic shear strain, it could be regressed by the formula suggested by this paper, and the fitting result is in good agreement. Under the same conditions, the maximum dynamic shear modulus of loess in Chengde is much smaller than that in central and western regions, and the increase rate of damping ration of loess in Chengde is larger than that in central and western regions.

Key words: Chengdo in Hebei; loess; dynamic triaxial test; dynamic shear module; damping ratio; moisture content; dry density