

文章编号: 1000-7598 (2010) 02-0377-05

橡胶颗粒-砂混合物动剪切模量的试验研究

尚守平, 岁小溪, 周志锦, 刘方成, 熊 伟

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 橡胶与土的混合物已经广泛用于边坡、挡土墙以及路基回填中, 将其当作一种隔震材料用于基础隔震中去, 从基础隔震的角度来研究橡胶颗粒-砂混合物的动力性能。利用循环单剪仪测出不同固结压力下不同配比的橡胶颗粒-砂混合物的动剪模量, 绘出动剪模量随动剪应变的变化曲线, 并对其进行比较, 研究表明: 橡胶颗粒的存在可以有效地降低橡胶颗粒-砂混合物的动剪模量, 橡胶颗粒-砂混合物的动剪模量随固结压力增大而增大。

关 键 词: 橡胶; 砂; 动剪模量; 隔震

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Study of dynamic shear modulus of granulated rubber-sand mixture

SHANG Shou-ping, SUI Xiao-xi, ZHOU Zhi-jin, LIU Fang-cheng, XIONG Wei

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Rubber mixed with soil are applicable in lightweight fills for slopes, retaining walls, and embankments, utilizing it as a kind of seismic isolation material in base isolation, and see if it can produce fine seismic isolation effect. This paper researches on the dynamic properties of granulated rubber-sand mixtures from the angle of base seismic isolation. The dynamic shear modulus of the different proportions of the mixtures under different consolidation pressures were measured using cyclic simple shear test. And the curves of $G-\gamma$ (where G is shear modulus, γ is shear strain) were obtained and compared. Results show that the granulated rubber can efficiently reduce the dynamic shear modulus of the rubber-sand mixture, which increases with the increase of the consolidation pressure.

Key words: rubber; sand; dynamic shear modulus; seismic isolation

1 引 言

在实际工程中, 橡胶已广泛应用于边坡、挡土墙以及路基回填中, 也可作为添加剂来制作改性沥青^[1]。

此外, 随着社会的发展, 大量堆积的废旧轮胎已经成为一个严重的社会问题, 如何采取有效的措施, 循环使用这些橡胶是一个热点问题。所以, 利用废旧的轮胎来满足工程的需要, 是一个低廉而且环保的方法^[2]。

图 1 分别给出了普通建筑物的加速度反应谱和位移反应谱。一般钢筋混凝土建筑物刚性大、周期短, 所以进入建筑物的加速度大, 而位移反应小, 如图中 A 点所示。现在延长建筑物周期, 而保持阻尼不变, 则加速度反应被大大降低, 但位移反应却

有所增加, 如图中 B 点所示。要是再加大结构的阻尼, 加速度反应继续减弱, 位移反应得到明显抑制, 这就是图中的 C 点。

综上所述, 延长结构周期, 给予适当阻尼使结构的加速度反应大大减弱。同时, 让结构的大位移主要由结构物底部与地基之间的隔震系统提供, 而不由结构自身的相对位移承担。这样一来, 结构在地震过程中发生的变形非常之小, 甚至像刚体那样作轻微平动, 从而为结构物的地震防护提供更加良好的安全保障, 这就是建筑结构基础隔震的基本原理。

橡胶具有较高的弹性性能和良好的抗疲劳性能, 所以它有着很好的阻尼特性。与其他建筑材料相比, 其特点如下: ①较大的弹性变形能力; ②橡胶颗粒的弹性模量较小; ③应力-应变曲线没有明显

收稿日期: 2009-09-22

基金项目: 湖南省科技厅科技计划重点项目 (No. 06sk4057); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50578062, No. 50278033)。

第一作者简介: 尚守平, 男, 1953 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程研究与教学工作。E-mail: sps@hnu.cn

的屈服点;④外力移除时能从较大变形中恢复^[1]。这些特点使得橡胶-土的混合物具有很好的减震作用,完全有可能成为基础隔震体系,而它的动力性能则是能否成功用于基础隔震的关键。

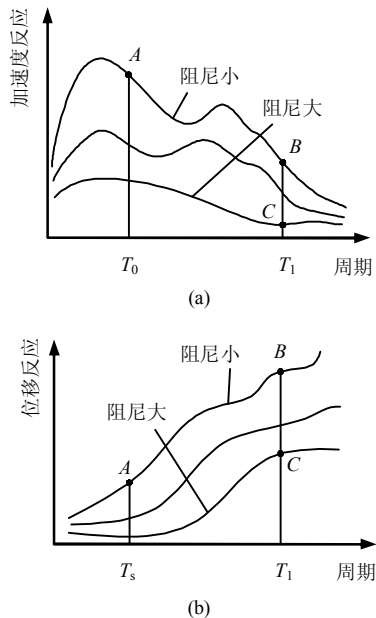


图1 基础隔震原理

Fig.1 Principle of base isolation

土的动剪模量是土动力学计算与分析的基本参数之一,也是场地地震安全性评价中必不可少的内容。本文的目的就是利用循环单剪仪测出 0 %、25 %、50 %、75 %、100 %等 5 个不同配比橡胶颗粒-砂混合物在 50、100、150、200 kPa 固结压力下的动剪模量,得出其不同固结压力下、不同配比的动剪模量-剪应变曲线,为进一步研究提供了有益的数据。

2 试样、试验仪器及试验方法

2.1 试样

本文试验研究的对象为橡胶颗粒-砂混合物,其中橡胶颗粒为普通机械破碎颗粒,粒径为 2~5 mm,相对密度为 1.08,重度为 5.3 kN/m³。砂为普通石英砂,粒径为 2~5 mm,相对密度为 2.55,重度为 13.8 kN/m³^[3]。两者之间按体积进行混合。

因大部分橡胶-土材料回填深度在地下水位以上,所以假定橡胶-土材料为干燥或者稍微湿润,含水率近似为 0。将橡胶颗粒和砂分别置于室内空气中,干燥 36 h 后再进行混合。试验中共做了 5 种不同配比的混合物,试样配比情况如表 1 所示。试验装样为根据试样的配合密度,按下式计算出试样的质量:

$$m_{\text{sample}} = \rho_{\text{mix}} V_{\text{sample}} \quad (1)$$

式中: m_{sample} 为放置入剪切盒内土样的质量; ρ_{mix} 为一定橡胶体积比混合物的密度; V_{sample} 为剪切盒的容积。算出质量后,将混合物装入剪切盒,分层击实,以保证其均匀性。

表 1 试样配比情况
Table 1 Specimens proportions

试样组号	橡胶颗粒体积比 / %	配合密度 / (g/cm ³)
1	0	1.38
2	25	1.17
3	50	0.94
4	75	0.75
5	100	0.53

2.2 试验仪器

循环单剪试验采用英国 WFi 生产的 WF25735 循环单剪试验系统。该系统由单剪仪、传感器和 PC 系统组成。其中单剪仪包括双伺服控制制动器、控制与数据采集系统、压缩机和试样制备设备;传感器包括竖向力传感器 (± 5.0 kN)、压力传感器 (1 000 kPa)、水平力传感器 (± 5.0 kN) 和位移传感器 (± 25 mm); PC 与数据采集系统连接,循环单剪系统能够双向气动加载,试验频率可高达 70 Hz,用户可自定义波形,能够进行平面应变量测、常高度剪切、常应力剪切以及常应变速率剪切。测量数据在每个循环周期中从 50 个测点测得,位移精度可达 1 μm。

2.3 试验方法

循环单剪试验采用正弦波型加荷,振动频率为 1 Hz。轴向采用应力控制,以保持其固结压力在试验过程中不变。每组试样分别进行了 50、100、150、200 kPa 共 4 种固结压力下的剪切试验。水平向采用应变控制,由小到大分级施加剪应变^[4-5],测定剪应力和剪应变。

3 试验结果及分析

在循环单剪试验中施加剪应变 γ_d ,测定剪应力 τ_d ,可作出反映应变循环内各时刻动剪应力与动剪应变之间关系的滞回圈。改变动剪应变幅值,由应力-应变的最大值 $\tau_{d\max}$ 和 $\gamma_{d\max}$,可作出骨干曲线。滞回圈反映了动剪应变对动剪应力的滞后性,骨干曲线反映了动剪应力与动剪应变之间的非线性。由于土被视为黏弹性体,则其等效的动剪切模量采用割线模量来表示,即滞回圈顶点连线的动剪应力 τ_d 和动剪应变 γ_d ,动剪切模量的计算式表示为

$$G_d = \tau_d / \gamma_d \quad (2)$$

定义循环荷载作用下的最大动剪模量 G_{dmax} 为动剪应变 γ_d 趋于 0 时的动剪切模量, 并且对本文所研究的各配比试样在不同固结压力下的动剪模量 G 随动剪应变 γ 而衰减的曲线用以下公式进行拟合^[6]:

$$G/G_{max} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (3)$$

3.1 相同配比下不同固结压力的动剪切模量-剪应变曲线对比

图 2~6 为相同配比混合物在不同固结压力下动剪模量随剪应变变化曲线, 从图中可以看出, 相同剪应变时, 固结压力越大, 混合物的动剪模量就越大, 即橡胶颗粒-砂混合物的动剪模量随着固结压力的增大而增大。由于橡胶的弹性性能, 随着橡胶颗粒所占体积比例的增大, 橡胶颗粒-砂混合物的动剪模量衰减曲线非线性特性减弱。由图 6 可以看出, 100 % 的橡胶颗粒的动剪切模量-剪应变曲线更加平缓, 表现出更为明显的线弹性特征。

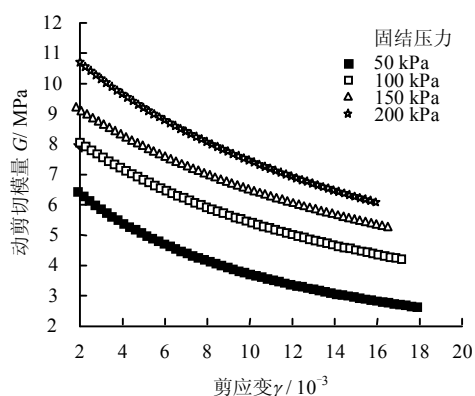


图2 不同固结压力下橡胶颗粒含量为 0 % 的 G - γ 曲线

Fig.2 Curves of G - γ under different consolidation pressures for 0 % rubber by volume

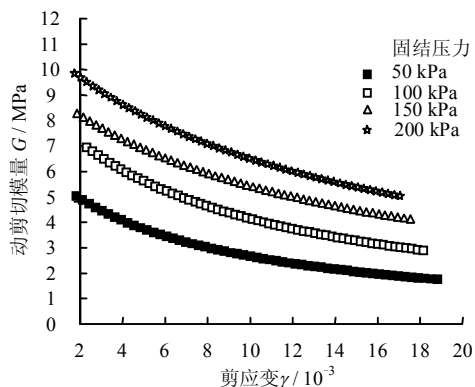


图3 不同固结压力下橡胶颗粒含量为 25 % 的 G - γ 曲线

Fig.3 Curves of G - γ under different consolidation pressures for 25 % rubber by volume

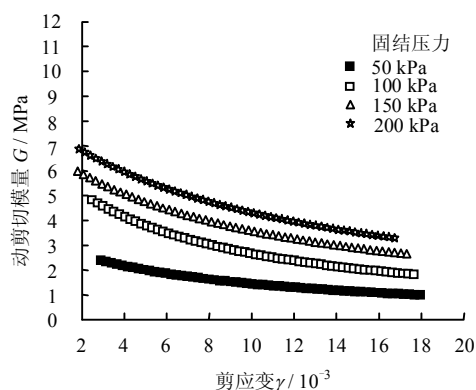


图4 不同固结压力下橡胶颗粒含量为 50 % 的 G - γ 曲线

Fig.4 Curves of G - γ under different consolidation pressures for 50 % rubber by volume

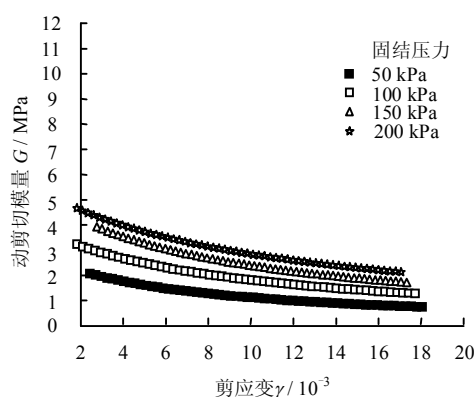


图5 不同固结压力下橡胶颗粒含量为 75 % 的 G - γ 曲线

Fig.5 Curves of G - γ under different consolidation pressures for 75 % rubber by volume

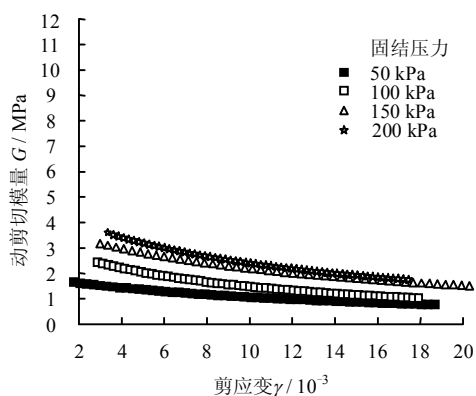


图6 不同固结压力下橡胶颗粒含量为 100 % 的 G - γ 曲线

Fig.6 Curves of G - γ under different consolidation pressures for 100 % rubber by volume

3.2 相同固结压力下不同配比混合物的动剪模量对比

图 7~10 给出了在各固结压力下不同配合比试样的动剪模量随动剪应变衰减的曲线, 表 2 为固结压力为 50 kPa 时不同配比的 G_{dmax} 和 γ_r 值, 由此可以更明显地看出配合比对混合物的动剪模量衰减曲线的影响: 橡胶颗粒-砂混合物的动剪模量随着剪应

变的增大而减小；随着橡胶颗粒比例的增大，混合物的动剪模量随之减小，混合物的非线性特征减弱。

由式（2）和表 2 可得橡胶颗粒含量为 25 % 的混合物的动剪切模量与剪应变之间的关系如下：

$$G = \frac{6.2}{1 + \gamma / 0.008} \tag{4}$$

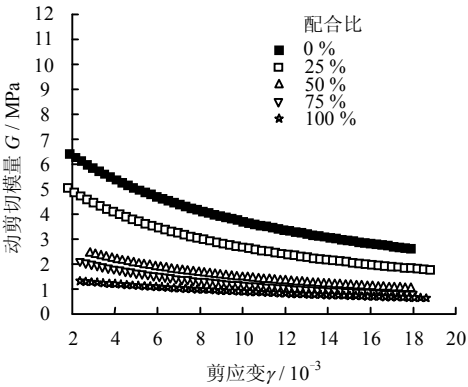


图 7 固结压力为 50 kPa 时不同配比橡胶土的 G-γ 曲线
Fig.7 Curves of G-γ under 50 kPa consolidation pressures for different percentage rubber by volume

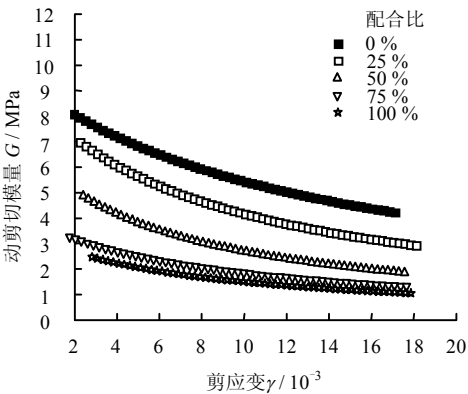


图 8 固结压力为 100 kPa 时不同配比橡胶土的 G-γ 曲线
Fig.8 Curves of G-γ under 100 kPa consolidation pressures for different percentage rubber by volume

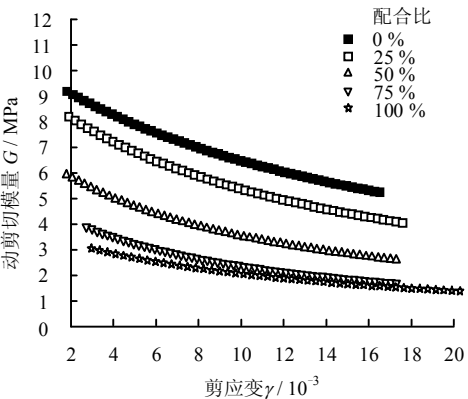


图 9 固结压力为 150 kPa 时不同配比橡胶土的 G-γ 曲线
Fig.9 Curves of G-γ under 150 kPa consolidation pressures for different percentage rubber by volume

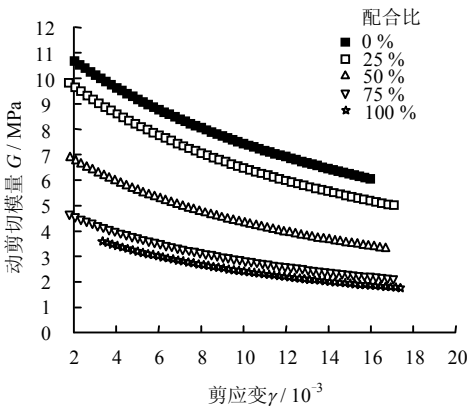


图 10 固结压力为 200 kPa 时不同配比橡胶土的 G-γ 曲线
Fig.10 Curves of G-γ under 200 kPa consolidation pressures for different percentage rubber by volume

表 2 固结压力为 50 kPa 时不同配比的
最大动剪模量和剪应变值
Table 2 The maximum dynamic shear modulus
and shear strain of the different percentage mixture
under 50 kPa consolidation pressures

配比 / %	最大动剪模量 / MPa	参考剪应变
0	7.7	0.009
25	6.2	0.008
50	3.23	0.009
75	2.85	0.007
100	1.89	0.014

此外，通过对比各条动剪切模量随剪应变变化曲线可以看出，动剪切模量随剪应变增大而减小，在小应变时减小的幅度较大（曲线较陡），大应变时减小的幅度较小（曲线趋于平缓）。

4 机制分析

4.1 固结压力对动剪模量的影响

固结压力对混合物动剪模量的影响，从微观上可以作如下分析：土体是由离散的颗粒材料所组成的，其所表现出来的力学性质由土颗粒之间的自身黏聚力和摩擦咬合力共同决定。但颗粒之间的黏聚力是有限的，土体的整体力学性质更多的是受颗粒间的摩擦咬合力影响。随着固结压力（或平均主应力）的增大，颗粒间的摩擦咬合更紧密，颗粒排列也有可能发生变化而趋于更均匀密实，那么宏观表现出来就是其弹性性质得到加强，抵抗剪切变形的能力也更强。

4.2 橡胶颗粒含量对动剪模量的影响

由试验结果可以看出，固结压力为 50 kPa 时，砂的 $G_{dmax} = 7.7$ MPa，橡胶颗粒的 $G_{dmax} = 1.89$ MPa，减小了 75 % 左右。这是由于橡胶具有较大的弹性变形能力和较低的弹性模量，使得混合物能在较小的

水平力下产生较大的剪切位移, 即混合物的动剪模量较小。

5 结 论

通过对比分析, 可以得出以下有益的结论:

(1) 固结压力和橡胶颗粒的含量是影响橡胶颗粒-砂混合物动剪模量的主要因素, 在相同配比下, 混合物的动剪切模量随着固结压力的变大而增大; 在固结压力不变的情况下, 橡胶颗粒含量越多, 混合物的动剪切模量就越小; 随着橡胶相对密度的增大, 橡胶颗粒的动剪切模量-剪应变曲线更加平缓, 即非线性特性减弱。

(2) 由于有了橡胶颗粒的存在, 有效地减小了橡胶颗粒-砂混合物的动剪切模量, 而且效果十分明显, 证明橡胶颗粒-砂混合物有着较小的剪切刚度, 用橡胶颗粒作为基础隔震体系成为可能。

(3) 本文的试验为进一步研究橡胶颗粒-砂作为一种基础隔震材料提供了有益的数据。

参 考 文 献

- [1] FENG ZHENG-YI, KEVIN G SUTTER. Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2000, 23(3): 338—344.
- [2] TANG HING-HO. Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries[J]. **Earthquake Engng. Struct. Dyn.**, 2007.
- [3] 南京水利科学研究所. 土木试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [4] 尚守平, 卢华喜, 任慧, 等. 粉质黏土动剪模量的试验对比研究[J]. **岩土工程学报**, 2006, 28(3): 410—414.
SHANG Shou-ping, LU Hua-xi, REN Hui, et al. Comparative study on dynamic shear modulus of silty clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 410—414.
- [5] 尚守平, 卢华喜, 任慧, 等. 动荷载作用下土阻尼比的试验对比研究[J]. **地震工程与工程振动**, 2006, 26(2): 161—165.
SHANG Shou-ping, LU Hua-xi, REN Hui, et al. Laboratory experimental comparative study on damping ratio of soil subjected to dynamic loading[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2006, 26(2): 161—165.
- [6] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [7] EDIL T B, BOSSCHER P J. Engineering properties of tire chips and soil mixture[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1994, 17(4): 453—464.
- [8] MASAD E, TAHA R, HO C, et al. Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1996, 19(3): 297—304.
- [9] FOOSE G J, BENSON C H, BOSSCHER P J. Sand reinforced with shredded waste tires[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1996, 122(9): 760—767.
- [6] COLES M E, HAZLETT R D, SPANNE P, et al. Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 1998, 19: 55—63.
- [7] YOSHITO N, TSUKASA N, KOICHI N. Three-dimensional diffusion of non-sorbing species in porous sandstone: computer simulation based on X-ray microtomography using synchrotron radiation[J]. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2004, 74: 253—364.
- [8] XIA Ting-feng, CHEN Si-li, ZHOU Hui. Real-time computerized tomography (CT) experiments on sandstone damage evolution during triaxial compression with chemical corrosion[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41: 181—192.
- [9] ZHOU X P, ZHANG Y X, HA Q L. Real-time computerized tomography (CT) experiments on limestone damage evolution during unloading[J]. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2008, 50: 49—56.
- [10] 章毓晋. 图像工程(上册)图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 214—240.
- [11] 宫伟力, 张艳松, 安里千. 基于图像分割的煤岩孔隙多尺度分形特征[J]. **煤炭科学技术**, 2008, 36(6): 28—32.
GONG Wei-li, ZHANG Yan-song, AN Li-qian. Multi-scale fractal features of coal and rock porosity based on image segmentation[J]. **Coal Science and Technology**, 2008, 36(6): 28—32.
- [12] 谢和平. 分形岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

上接第 376 页