

# 橡胶粉对重塑黄土动力特性影响的试验

胡志平<sup>1,2</sup>, 刘卓华<sup>1</sup>, 张志权<sup>1,2</sup>, 许婧伟<sup>1</sup>, 严小宝<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 地下结构与工程研究所, 陕西 西安 710061)

**摘 要:**将橡胶粉干质量百分比分别设定为 6%、9% 和 15% 这 3 种配合比, 重塑橡胶粉-黄土混合土试样, 采用动三轴试验系统对橡胶粉-黄土混合土试样进行了不固结不排水三轴剪切试验, 研究了橡胶粉对重塑黄土动力特性的影响规律。试验结果表明:混合土动弹性模量随橡胶粉含量的增加而逐渐降低, 混合土的最大动弹性模量  $E_{dmax}$  与最大动剪切模量  $G_{dmax}$  随橡胶粉含量的增加而明显降低; 当动剪应变  $\gamma_d$  在 0~0.002 范围内时, 橡胶粉含量对动剪切模量比  $G_d/G_{dmax}$  影响不大, 当动剪应变  $\gamma_d$  大于 0.002 时, 混合土的  $G_d/G_{dmax}$  随着橡胶粉含量的增加而增大; 动剪应变  $\gamma_d$  在 0~0.01 范围内时, 阻尼比变化幅度很大, 当动剪应变  $\gamma_d$  大于 0.01 后, 阻尼比趋于稳定; 混合土最大阻尼比随橡胶颗粒含量的增加而增大。

**关键词:**土木工程; 橡胶粉; 重塑黄土; 动三轴试验; 动力特性

**中图分类号:** TU 435

**文献标志码:** A

## Test on influence of rubber powder on dynamic mechanic properties of manipulated loess

HU Zhi-ping<sup>1,2</sup>, LIU Zhuo-hua<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-quan<sup>1,2</sup>, XU Jing-wei<sup>1</sup>, YAN Xiao-bao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Institute of Underground Structure and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** Manipulated loess and rubber powder was mixed with percentage of rubber powder as 6%, 9% and 15% respectively. Triaxial shear test on manipulated loess sample was conducted by dynamic triaxial test system under unconsolidated and undrained condition, and the influence of rubber powder on the dynamic mechanic properties was studied. The results show that the dynamic modulus ( $E_d$ ) of manipulated loess decreases with the increment of rubber powder percentage, and the maximum dynamic modulus ( $E_{dmax}$ ) and dynamic shear modulus ( $G_{dmax}$ ) decrease significantly with the increment of rubber powder percentage. The influence of rubber powder percentage on the dynamic shear modulus ratio ( $G_d/G_{dmax}$ ) is not obvious when the dynamic shear strain ( $\gamma_d$ ) is in the range of 0 and 0.002 but the dynamic shear modulus ratio ( $G_d/G_{dmax}$ ) increases with the increment of rubber powder percentage when the dynamic shear strain ( $\gamma_d$ ) exceeds 0.002. When the dynamic shear strain ( $\gamma_d$ ) is in the range of 0 and 0.001, the damping ration changes significantly. When the dynamic shear strain ( $\gamma_d$ ) exceeds 0.01, the damping ratio tends to be steady and the maximum damping ratio of manipulated loess increases with the increment of rubber powder percentage. 5 tabs, 6 figs, 15 refs.

**Key words:** civil engineering; rubber powder; manipulated loess; dynamic triaxial test; dynamic mechanic property

## 0 引言

橡胶粉混合土是一种新型土工材料,具有质量轻、强度高、变形协调性好以及废物二次利用等优点,在地下工程中的利用越来越受到重视。邓安等研究了掺入轮胎橡胶颗粒的砂土的剪切性状,研究结果表明砂-轮胎橡胶颗粒轻质土工填料发生剪缩现象,应力-应变曲线的硬化水平随围压的增加而增高;轮胎橡胶颗粒含量增加会影响围压与体积变形的关系<sup>[1]</sup>。辛凌等通过常规三轴试验和无侧限抗压强度试验,研究了废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土的强度特性,试验结果表明,在一定范围内改变这种混合土的配合比,可以调节混合土的强度与和易性,使其满足工程应用的需要<sup>[2-3]</sup>。Bosscher 等对废弃轮胎橡胶颗粒与砂土的混合物作为路堤填料进行了研究,研究结果认为,橡胶颗粒-土混合物在荷载作用初期具有良好的塑性,这种塑性能力达到纯橡胶颗粒的 40% 左右,一旦混合物压密至这种密实程度就表现为弹性;纯橡胶颗粒在弹性阶段的约束变形模量是纯砂的百分之一,而当砂的质量分数达到 30% 时,橡胶颗粒-砂土混合料的约束变形模量就接近纯砂的约束变形模量<sup>[4]</sup>。Pierce 等对由废弃轮胎生产的橡胶团粒替换砂土作为轻质透水层填料的适应性进行了研究,研究结果表明,橡胶团粒能够成功地用于制造轻质透水层填料,橡胶团粒和混凝土砂的混合物 28 d 龄期抗压强度到达 269~1 194 kPa,用轻质填料能有效地减少下伏地层压力,从而减小了承载力失效的风险和地基沉降量<sup>[5]</sup>。Kerry 等就垃圾填埋场中废弃轮胎碎块和卵石的渗流阻塞效应进行了研究,结果表明,尺寸为 100 mm×50 mm×10 mm 和 125 mm×40 mm×10 mm 的橡胶碎块在压力 150 kPa 下的压缩性分别为 48% 和 44%,针对垃圾填埋场滤液的渗透系数分别为 0.007 m/s 和 0.02 m/s,而粒径为 38 mm 的卵石的渗透系数为 0.8 m/s;在 150 kPa 压力下,卵石对垃圾填埋场滤液的渗透系数大于  $10^{-5}$  m/s,所持续的时间是橡胶碎块持续时间的 3 倍<sup>[6]</sup>。Tanchaisawat 等对土工格栅和废弃轮胎碎片-砂土混合物之间的相互作用进行了研究,主要通过对填料的物理性质、抗剪强度、相互作用系数、格栅加筋效率等进行了分析,结

果认为轮胎碎片和砂土的质量比为 30:70 和体积比为 50:50 时,填料混合物是最合适的<sup>[7]</sup>。以上诸研究成果中废弃轮胎橡胶团粒或碎块粒径较粗,混合料中土料是砂土或卵石等粗颗粒,而不是黄土等极细土颗粒,由粒径较小的橡胶粉和极细的黄土颗粒组成的混合物的动力特性值得研究<sup>[8-9]</sup>。

在中国广袤的西北地区,许多建筑不可避免的要以黄土为地基,尤其是近几年来,西安、兰州和乌鲁木齐等城市正大力修建地铁工程,地铁列车在低频振动作用下对地基产生一定的影响<sup>[10-11]</sup>。黄土和橡胶粉混合土的动力特性如何,橡胶粉含量对混合土的动力特性有何影响,此方面的研究对采用黄土和橡胶粉混合料作为隔震(减震)材料的工程具有重要意义。因此,本文通过室内振动三轴试验,研究了不同配合比下黄土橡胶粉混合土在反复荷载下的动力特性。

## 1 试验方案

### 1.1 试验设备

试验所用仪器为西安力创材料检测技术有限公司设计制造的 W3Z20 型微机控制电液伺服土动三轴试验机,该仪器主要用于土的动力学试验,还可以进行静力学三轴试验。试验机的轴向激振动态负荷为  $\pm 20$  kN,三轴压力室压力为 0~1 MPa;试验的试样尺寸可以采用  $\Phi 61.8 \times 150$  mm 和  $\Phi 39.1 \times 80$  mm 两种;轴向、侧向既可以实现分别激振,也可以实现复合激振,可以模拟在正弦波、三角波、方波、梯形波状态下的动态试验。

试验采用正弦波循环加载方式,试样直径为 39.1 mm、高度 80 mm,加载频率 1 Hz、围压为 200 kPa,采用不固结不排水方式进行试验,轴向动荷载峰值为 10~60 kPa,分级加载级差为 5 kPa,每级荷载振动 5 次<sup>[12]</sup>。

### 1.2 试样制备

本试验试样材料为烘干过筛黄土(黄土取自西安市观音庙地铁站)、橡胶粉、重晶石粉。橡胶粉粒径为 40 目,重晶石粉粒径为 200 目、表观密度为  $4.5 \text{ g/cm}^3$ ,材料样品如下页图 1 所示。

试验所用烘干黄土过 2 mm 孔径的筛,此次试验标记约定:A 为橡胶粉干质量分数,B 为重晶石粉

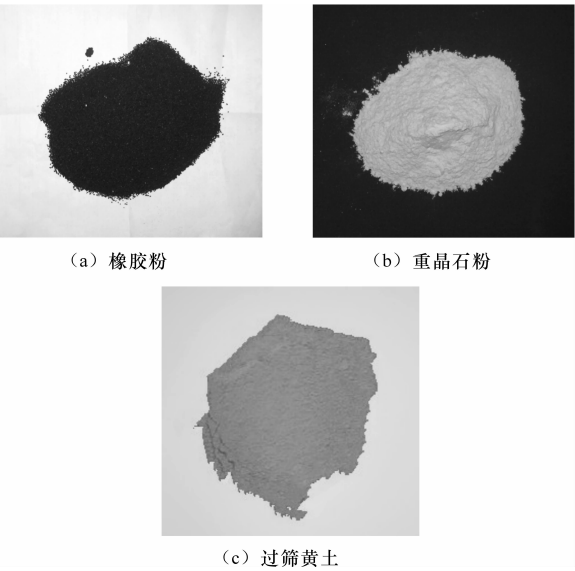


图 1 橡胶粉、重晶石粉及过筛黄土

Fig. 1 Rubber powder, barite powder and screened loess  
干质量分数(如 A11-B8 表示在混合土中橡胶粉干质量占总干质量的 11%、重晶石粉干质量占总干质量的 8%、其余为黄土干质量)。过筛干黄土样如图 1 所示,其粒度成分见表 1、物理力学指标见表 2。

表 1 过筛黄土的粒度成分

不同颗粒(mm)的组成(质量分数)/%		
>0.05	0.05~0.005	<0.005
40.20	52.94	6.86

表 2 过筛黄土的物理力学指标

物理指标			力学指标		
颗粒密度 $G_s/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	压缩模量 $E_s/\text{kPa}$	内聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦 角 $\Phi/(\circ)$
2.71	30.1	19.2	14.8	7.5	15.6

在试验中采用击实成型法制备试样,先将烘干土过 2 mm 筛,按照一定的配合比和含水率,对土喷洒水,调配均匀后密封存放 24 h,将土料在击实桶中分层击实,试样干密度符合试验要求<sup>[13]</sup>。将击实好的试样用分土器切割成直径 39.1 mm、高 80 mm 的圆柱体,装入土模器,放进保湿器进行养护。圆柱体试样如图 2 所示,橡胶粉-黄土混合土的物理力学指标见表 3。

1.3 试验步骤

- (1)准备工作。仔细检查试验系统各部分,连好电缆、管路,确认动三轴试验系统完全正常。
- (2)安装试样。首先使孔压管路完全充水以排除空气,然后在试验底座套扎试样膜,安上对开试膜,

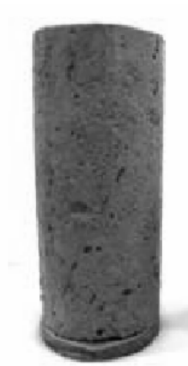


图 2 动三轴试样

Fig. 2 Vibration triaxial experiment sample

表 3 橡胶粉-黄土混和土物理力学指标

土配合比	含水率 $W/\%$	密度 $\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	内聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\Phi/(\circ)$
A15-B30	23.4	1.76	4.5	22.5
A9-B30	24.3	1.86	5.6	20.2
A6-B30	23.7	1.92	7.5	21.1

将乳胶膜翻套在试模壁上,按照上述制样方法脱模后,装上压力室罩。

(3)不固结不排水。启动系统,压力室进水,消除负压,使排水管内水面与试样中点同高。逐一进行测量系统调零,加围压 200 kPa,跳过固结过程。

(4)振动试验。关闭排水阀,按照上述加载方案进行振动试验。微机自动采集测试数据。

(5)试验结束。卸掉围压,拆除压力室罩和试样,清洗各有关部位。

(6)每种配比试样进行 3 组试验,然后对试验数据进行计算、整理。

2 试验结果分析

2.1 动弹性模量  $E_d$  和阻尼比  $\lambda$

将一定密度与含水量的圆柱体试样(直径 39.1 mm,高 80 mm),在轴对称三轴应力下进行不固结不排水条件下的振动试验,通过振动三轴试验测定混合土的动弹性模量和阻尼比<sup>[14-15]</sup>。其方法是:振动试验轴向加载从小幅值开始,逐级加大作用于试样的轴向动应力,当应变波形明显不对称或应变达到破坏标准(应变达到 5%)时,试验终止。数据采集系统自动记录应力-应变滞回曲线,将试验过程中采集到的各级荷载下的动应力应变数据进行整理,从而得到各级动应变时的动弹性模量  $E_d$  和阻尼比  $\lambda$ 。

采用残余变形(孔压)较小的若干级循环,每级循环中选取有代表性的滞回曲线计算动弹性模量和阻尼比。方法是:将选取的滞回曲线拟合为椭圆,则椭圆长轴的斜率为动弹性模量,长轴与椭圆的交点坐标(相对值)为动应力幅值和动应变幅值,如图 3 所示。无法拟合时可适当剔除不合理数据,并用相应的数学软件处理。

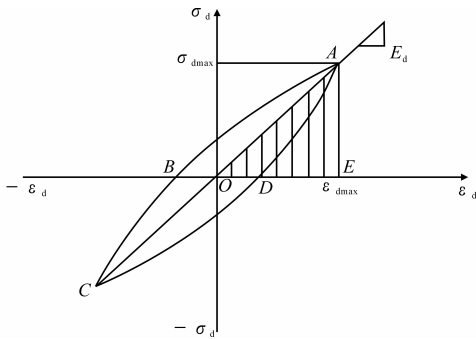


图 3 动应变  $\epsilon_d$  与动应力  $\sigma_d$  的关系

Fig. 3 Dynamic strain  $\epsilon_d$  vs dynamic stress  $\sigma_d$

阻尼比  $\lambda$  按式(1)进行计算

$$\lambda = \frac{A}{4\pi A_s} \quad (1)$$

式中: $A$  为滞回圈  $ABCD$  的面积; $A_s$  为三角形  $AOE$  的面积。

动弹性模量  $E_d$  按式(2)或式(3)进行计算

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

$$\frac{1}{E_d} = a + b\epsilon_d \quad (3)$$

式中: $a, b$  为试验拟合系数。

动三轴试验中测得的是轴向动应力  $\sigma_d$  和轴向动应变  $\epsilon_d$  之间的关系,计算得到的是动弹性模量  $E_d$ ,  $E_d$  与动剪应变  $\gamma_d$  和动剪切模量  $G_d$  之间有如下换算关系

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\mu)} \quad (4)$$

$$\gamma_d = (1+\mu)\epsilon_d \quad (5)$$

式中: $\mu$  为泊松比,在本次动三轴振动试验中取 0.34。

通过多组橡胶粉-黄土混合土的动三轴振动试验,得到了各种配比混合土的  $E_d$  与  $\epsilon_d$ 、 $\lambda$  与  $\gamma_d$  的关系曲线。

## 2.2 $G_d/G_{dmax}$ 与 $\gamma_d$ 的曲线分析

本次试验对 3 种配合比(A15-B30、A9-B30、A6-B30)的橡胶粉-黄土混合土进行了动三轴试验,试验得到的动剪模比( $G_d/G_{dmax}$ )随动剪应变( $\gamma_d$ )的变化曲线,如图 4 所示。

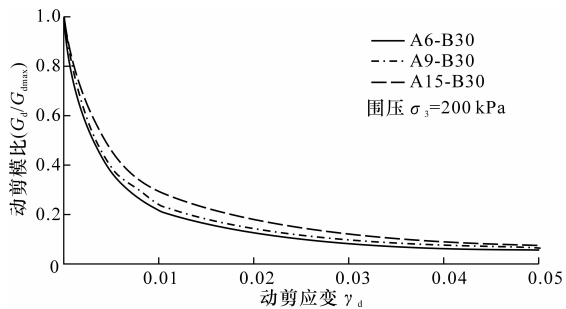


图 4  $G_d/G_{dmax}$  与  $\gamma_d$  关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of  $G_d/G_{dmax}$  and  $\gamma_d$

对配合比为 A6-B30 的混合土,由土的动三轴试验得到的  $G_d/G_{dmax}$  与  $\gamma_d$  的曲线方程为

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{(1 + \gamma_d/0.002630)} \quad (6)$$

对配合比为 A9-B30 的混合土,由土的动三轴试验得到的  $G_d/G_{dmax}$  与  $\gamma_d$  的曲线方程为

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{(1 + \gamma_d/0.003112)} \quad (7)$$

对配合比为 A15-B30 的混合土,由土的动三轴试验得到的  $G_d/G_{dmax}$  与  $\gamma_d$  的曲线方程为

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{(1 + \gamma_d/0.004079)} \quad (8)$$

由图 4 及式(6)~式(8)可知:动剪应变  $\gamma_d$  在 0~0.002 范围内时,3 种配合比试样的动剪模比  $G_d/G_{dmax}$  相差不大;当动剪应变  $\gamma_d$  大于 0.002 时,随着橡胶粉含量的增加,试样的动剪模比增大。

## 2.3 $E_d$ 与 $\epsilon_d$ 的曲线分析

本次试验对 3 种配合比(A15-B30、A9-B30、A6-B30)的橡胶粉-黄土混合土进行了动三轴试验,试验得到的动弹性模量( $E_d$ )随动应变( $\epsilon_d$ )的变化曲线,如图 5 所示。

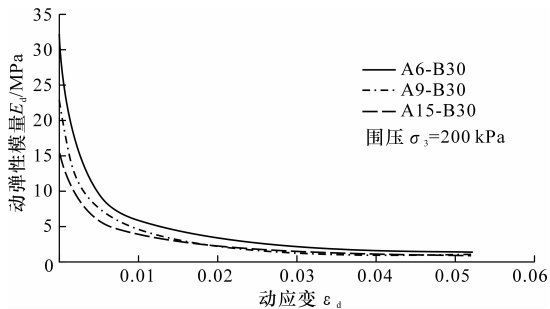


图 5  $E_d$  与  $\epsilon_d$  的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of  $E_d$  and  $\epsilon_d$

由图 5 可知,在相同围压  $\sigma_3$  下,3 种配合比的橡胶粉-黄土混合土的  $E_d$  与  $\epsilon_d$  的关系曲线趋势基本一致,均表现为随动应变  $\epsilon_d$  的增大,动弹性模量  $E_d$

逐渐降低,降低到一定程度后趋于稳定。当动应变  $\epsilon_d$  在  $0\sim 0.01$  范围内时,动弹性模量  $E_d$  随动应变  $\epsilon_d$  的变化率较大;当动应变  $\epsilon_d$  大于  $0.01$  后,动弹性模量  $E_d$  随动应变  $\epsilon_d$  的变化趋于稳定。从图 5 中还可以看出,橡胶颗粒含量对土体动弹性模量  $E_d$  的影响较大,在相同的动应变  $\epsilon_d$  条件下,动弹性模量  $E_d$  随橡胶粉含量的增加而逐渐降低。

工程中常用最大动弹性模量  $E_{dmax}$  作为参考指标,配合土的动力本构关系接近双曲线模型。因此,配合土动三轴试验所得的动模量倒数  $1/E_d$  与动应变  $\epsilon_d$  之间有如下拟合关系

$$1/E_d=a'+b'\epsilon_d$$

(9)

式中: $a'$ 、 $b'$  分别为拟合直线的截距和斜率,当  $\epsilon_d=0$  时, $1/a'$  即代表最大动弹性模量  $E_{dmax}$ ,最大动剪切模量  $G_{dmax}$  可以通过(4)式换算得到。线性拟合得到的有关数据见表 4。

表 4 最大动弹性模量  $E_{dmax}$  线性拟合数据

Tab. 4 Linear fitting data of  $E_{dmax}$

土样编号	$a'$	$b'$	最大动弹性模量 $E_{dmax}/\text{MPa}$	最大动剪切模量 $G_{dmax}/\text{MPa}$
A6-B30	0.030 9	11.76	32.327	12.06
A9-B30	0.042 1	14.47	23.726	8.85
A15-B30	0.064 0	15.68	15.610	5.82

由表 4 可以看出,橡胶颗粒含量对混合土的最大动弹性模量与最大动剪切模量有显著影响,随着橡胶颗粒含量的增加,混合土的  $E_{dmax}$  与  $G_{dmax}$  明显降低。

表 5 动剪应变标准点的动剪切模量比( $G_d/G_{dmax}$ )比和阻尼比( $\lambda$ )

Tab. 5 Dynamic shear modulus ratios( $G_d/G_{dmax}$ ) and damping ratios( $\lambda$ ) at shear strain standard point

土样编号	动剪应变 $\gamma_d$	$5\times 10^{-6}$	$1\times 10^{-5}$	$5\times 10^{-5}$	$1\times 10^{-4}$	$5\times 10^{-4}$	$1\times 10^{-3}$	$5\times 10^{-3}$	$1\times 10^{-2}$
A6-B30	动剪切模量比 $G_d/G_{dmax}$	0.998 0	0.995 9	0.980 0	0.961 0	0.829 7	0.708 9	0.328 0	0.196 0
	阻尼比 $\lambda$	0.003 9	0.007 7	0.034 0	0.058 0	0.142 0	0.173 0	0.210 0	0.215 0
A9-B30	动剪切模量比 $G_d/G_{dmax}$	0.998 3	0.996 6	0.983 0	0.967 0	0.853 5	0.744 4	0.368 0	0.226 0
	阻尼比 $\lambda$	0.002 0	0.003 9	0.018 0	0.068 0	0.109 3	0.151 1	0.218 0	0.230 0
A15-B30	动剪切模量比 $G_d/G_{dmax}$	0.998 0	0.996 0	0.981 0	0.963 0	0.840 0	0.725 0	0.345 0	0.208 0
	阻尼比 $\lambda$	0.004 0	0.008 0	0.035 0	0.063 0	0.169 0	0.214 0	0.273 0	0.282 0

由表 5 可知,3 种配合比的混合土均呈现动剪切模量比  $G_d/G_{dmax}$  随动剪应变  $\gamma_d$  的增加而减小,阻尼比  $\lambda$  都随着动剪应变  $\gamma_d$  的增加而增加,最后趋于稳定;随着橡胶颗粒含量的增加,混合土的最大阻尼比增大。

3 结 语

(1)在相同围压  $\sigma_3$  下,混合土的动弹性模量  $E_d$

2.4  $\lambda$  与  $\gamma_d$  的曲线分析

本次试验对 3 种配合比(A15-B30、A9-B30、A6-B30)的橡胶粉-黄土混合土进行了动三轴试验,试验得到的阻尼比( $\lambda$ )随动剪应变( $\gamma_d$ )的变化曲线如图 6 所示。

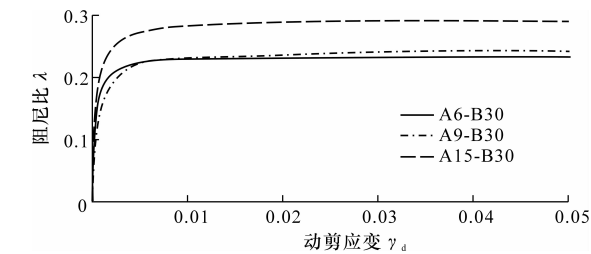


图 6  $\lambda$  与  $\gamma_d$  的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of  $\lambda$  and  $\gamma_d$

由图 6 可知,不同配合比混合土的动剪应变与阻尼比的关系曲线变化趋势基本一致,随着动剪应变的增加,阻尼比明显增大,阻尼比增大到一定程度后趋于稳定。动剪应变在  $0\sim 0.01$  范围内时,阻尼比变化幅度很大;当动剪应变大于  $0.01$  后,阻尼比趋于稳定,此时阻尼比为最大阻尼比。由图 6 还可以看出,橡胶颗粒含量对混合土阻尼比的影响较大,当动剪应变大于  $0.01$  后,阻尼比随橡胶颗粒含量的增加而增大。

各种配合比下橡胶粉-黄土混合土在动剪应变  $\epsilon_d$  标准点所对应的动剪切模量比  $G_d/G_{dmax}$  和阻尼  $\lambda$  比见表 5。

随动应变  $\epsilon_d$  的增大而显著降低,降低到一定程度后趋于稳定;在相同的动应变  $\epsilon_d$  条件下,动弹性模量  $E_d$  随橡胶粉含量的增加而逐渐降低;混合土的  $E_{dmax}$  与  $G_{dmax}$  随橡胶粉含量的增加而明显降低。

(2)当动剪应变  $\gamma_d$  在  $0\sim 0.002$  范围内时,3 种配合比试样的动剪模比  $G_d/G_{dmax}$  相差不大;当动剪应变  $\gamma_d$  大于  $0.002$  时,随着橡胶粉含量的增加,混合土的动剪模比  $G_d/G_{dmax}$  增大。

(3)不同配合比混合土的动剪应变  $\gamma_d$  与阻尼比  $\lambda$  的关系曲线变化趋势基本一致,动剪应变在  $0 \sim 0.01$  范围内时,阻尼比变化幅度很大;当动剪应变大于  $0.01$  后,阻尼比趋于稳定,混合土最大阻尼比随橡胶颗粒含量的增加而增大。

## 参考文献:

## References:

- [1] 邓安,冯金荣.掺入轮胎橡胶颗粒对沙土剪切性状的影响[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2009,10(5):483-487.  
DENG An, FENG Jin-rong. Effect of scrap tire bead addition on shear behavior of sand[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 10(5): 483-487. (in Chinese)
- [2] 辛凌,刘汉龙.废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土强度特性试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(3):428-433.  
XIN Ling, LIU Han-long. Consolidated undrained triaxial compression tests on lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 428-433. (in Chinese)
- [3] 辛凌,刘汉龙.废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土无侧限抗压强度试验[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2010,11(1):79-83.  
XIN Ling, LIU Han-long. Unconfined compressive test of lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 11(1): 79-83. (in Chinese)
- [4] Bosscher P J, Thncer B E, Senro K. Design of highway embankments using tire chips[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4): 295-304.
- [5] Pierce C E, Blackwell M C. Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill[J]. Waste Management, 2003, 23(3): 197-208.
- [6] Kerry R R, Reagan M. Clogging of tire shreds and gravel permeated with landfill leachate[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(6): 682-693.
- [7] Tanchaisawat T, Bergado D T, Prempramote S. Interaction between geogrid reinforcement and tire chip-sand lightweight backfill [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 40(5): 320-326.
- [8] Lee H J, Roh H S. The use of recycled tire chips to minimize dynamic earth pressure during compaction of backfill [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(5): 1016-1026.
- [9] Youwail S, Bergado D T. Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material [J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(2): 103 - 114.
- [10] 胡志平,赵振荣,朱启东,等.西安某地裂缝两侧黄土物理力学性质试验[J].地球科学与环境学报,2009,31(1):85-88.  
HU Zhi-ping, ZHAO Zhen-rong, ZHU Qi-dong, et al. Experimental study on physical mechanic property of loess near ground fissure in Xi'an[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(1): 85-88. (in Chinese)
- [11] 贺农农,李攀,邵生俊,等.西安地铁隧道穿越饱和软黄土地段的地表沉降监测[J].地球科学与环境学报,2012,34(1):96-103.  
HE Nong-nong, LI Pan, SHAO Sheng-jun, et al. Ground settlement monitoring above Xi'an Metro tunnel through the saturated soft loess [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 96-103. (in Chinese)
- [12] 刘洋.土体的动模量和阻尼比的实验技术研究[D].大连:大连理工大学,2006.  
LIU Yang. Study on the test technology of dynamic modulus and damping ratio of soil [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [13] 刘保健,张晓荣,程海涛.应变控制下压实黄土的动三轴试验研究[J].岩土力学,2007,28(6):1073-1076.  
LIU Bao-jian, ZHANG Xiao-rong, CHENG Hai-tao. Study on compacted loess under strain control at dynamic triaxial test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1073-1076. (in Chinese)
- [14] 袁晓铭,孙锐,孙静,等.常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):133-139.  
YUAN Xiao-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4): 133-139. (in Chinese)
- [15] 何昌荣.动模量和阻尼的动三轴试验研究[J].岩土工程学报,1997,19(2):39-48.  
HE Chang-rong. Dynamic triaxial test on modulus and damping [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 39-48. (in Chinese)