

路基压实黄土动力特性的试验研究

李又云, 谢永利, 刘保健

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 在大量动三轴试验的基础上, 对压实黄土的动力特性进行研究。试验结果表明: 压实黄土的动应力-应变曲线在一定条件下近似为双曲线模型, 并得到部分试样的模型参数取值。压实黄土动弹性模量随着动应变的增加而减小, 逐渐趋于稳定, 并且在不同干密度、不同含水率及不同围压状态下变化趋势基本相同。阻尼比受含水率、固结应力比、干密度及围压等因素的影响, 综合反映为随动应变的增加而增加, 取值为0.2~0.3, 但离散性较强。振陷变形与干密度、含水率及荷载作用次数有着密切关系, 干密度愈大, 含水量越小, 振动次数愈大; 在同等的应力条件下, 振陷变形愈小, 并且存在一临界动应力。当动应力小于该值时, 振陷变形较小, 与动应力近似线性关系; 当动应力大于该值时, 振陷变形增加较快, 呈现明显的非线性。

关键词: 土力学; 压实黄土; 动弹性模量; 固结应力比; 阻尼比; 振陷变形

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)05-1037-10

EXPERIMENTAL RESEARCH ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ROADBED COMPACTION LOESS

LI Youyun, XIE Yongli, LIU Baojian

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: Based on a lot of dynamic triaxial tests, some dynamic characteristics on roadbed compaction loess are studies. It is indicated that from test results, the relation between stress and strain can be fitted with hyperbolic model under certain conditions, and the values of model parameters are and tend to be stable gained on some soil samples. Dynamic modulus of compaction loess decreases with the increase of dynamic strain, the trend is basically similar under different dry densities, water contents and pressures. Damping ratio is affected by the moisture, consolidation stress ratio, confining pressure and dry density of the compacted loess which increases with the increase of dynamic strain generally; and its value is distributed in 0.2 - 0.3 with high discreteness. The value of vibration deformation has important relation with the dry density, moisture and load cyclic number. When the dry density increases, moisture decreases, and load cyclic number increases. It decreases slowly at the same stress conditions, and there is critical dynamic stress. When the dynamic stress is smaller than it, vibration deformation is small and can be fitted linearly with the dynamic stress, otherwise, it increases quickly and presents obvious non-linearity.

Key words: soil mechanics; compaction loess; dynamic elastic modulus; consolidation stress ratio; damping ratio; vibration deformation

收稿日期: 2008-11-21; **修回日期:** 2009-02-23

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目资助(200131800019)

作者简介: 李又云(1973-), 男, 2007年于长安大学岩土工程专业获博士学位, 现任讲师, 主要从事地基处理方面的教学与研究工作。E-mail: liyouyun2006@163.com

1 引言

目前高速公路发展迅速，交通量与车辆荷载也快速增大，造成高速公路病害频发，使高速公路的使用寿命急剧降低。究其原因，其与车辆荷载反复作用下路基的沉降变形密切相关。关于车辆荷载作用下路基沉降变形的研究方法一般是将其转化为静载，但实际上车辆荷载与静载相比有很大不同，车辆荷载作用下路基土所表现出来的工程特性与其在静载作用下所表现出来的性质也有很大的不同。经研究，路基土在车辆荷载作用下引起的累积变形可分为两部分：一部分是在车辆荷载作用下所产生的振陷变形，另一部分是路基土所产生的固结变形^[1~5]。因此，研究路基土的累积变形对于公路病害的防治是必不可少的。国外专家的最新研究成果表明，路基土的塑性变形对路面病害的影响有时比路面自身的影响还大。综上所述，研究路基土的动力特性，对加深路基工作原理的理解以及对发展新的路面力学设计方法都有理论意义和工程应用价值。

黄土主要分布在我国西北与华北等地区，面积达 $64 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是第四纪地质历史时期干旱气候条件下的沉积物，具有独特的工程力学性质^[4, 6]。随着我国西部大开发的推进，高速公路在该地区的修筑规模日益扩大，因此开展路基压实黄土动力特性的研究具有十分重要的现实意义。近年来，黄土动力特性的研究取得了一些初步的研究成果，但是其研究多集中于原状黄土，对压实黄土动力特性的研究则较为少见。不同类型的黄土所表现的动力特性有所不同，本文以西安地区黄土为研究对象，进行黄土压实后的 GDS 三轴试验，揭示其动力特性，路基土在车辆荷载作用下的受力与变形状态的理解具有一定价值。

2 试验概况

2.1 试验仪器

试验设备为 GDS 动三轴仪。GDS 动三轴仪主要由三大系统组成：加荷系统、控制和数据采集系统及荷载控制系统。其中，控制和数据采集系统包括径向和轴向 2 个控制和数据采集盒；荷载控制系

统包括轴压控制系统、围压控制系统及数字压力控制系统，能够提供围压、反压和精确测量试样的体积变化；该套系统吸收了先进的机械制造工艺和自动化控制技术，量测与控制精度高且实现了数字化操作，根据需要即可手动操作而由计算机记录数据，也可直接由计算机通过 GDSLAB 软件控制试验进行并记录数据。为提高试验控制精度，该试验设备的压力控制系统中各传感器需要定期进行标定，图 1 为轴向应力传感器标定曲线。

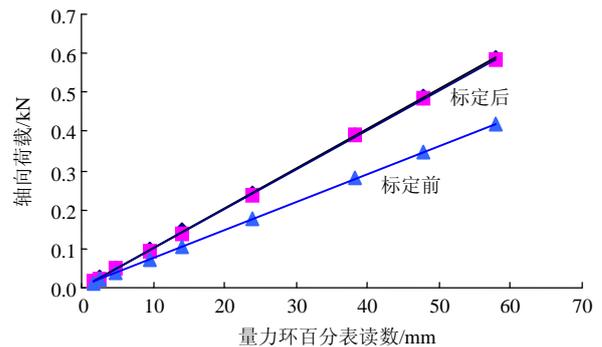


图 1 轴向应力传感器标定曲线
Fig.1 Calibration curves of axial stress sensor

2.2 试样与试验方法

试验所用试样取自西安。土呈褐黄色，天然含水量在 13% 左右。按照《公路土工试验规程》(JTG E40 - 2007)，经室内试验得到黄土试样的基本物性指标如表 1 所示。从表 1 可以看出，该试验试样的级配良好。通过重型击实试验，试样的最佳含水量 $w = 15.8\%$ ，最大干密度 $\rho_{\max} = 1.76 \text{ g/cm}^3$ 。

表 1 黄土试样的基本物性指标
Table 1 Physical indexes of loess sample

塑限/%	液限/%	塑性指数	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
18.2	32.3	14.1	8.82	1.76

根据对已有研究资料的分析，黄土动力特性主要受到含水量、干密度与初始应力状态等因素的影响^[1, 4, 7]。因此，制备试样时含水率分别控制为 8%，12% 和 16%，试样干密度分别按 1.4，1.6 和 1.8 g/cm^3 三种密度进行控制。

试样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ，采用压样法制备。制样过程首先将取回的散土摊开风干，碾碎过筛，然后按照一定的含水率进行配水，放入保湿缸中浸润。配好水的试样用千斤顶分层压入到试样模

具中, 层高为 10 mm, 层与层之间用小刀划开, 以使层间接触良好, 保证试样的均匀性, 制备同组试样干密度之间的误差不超过 0.03 g/cm³。含水率为 8% 的试样难直接成型, 则采用间接制样, 即先制成相同干密度的含水量为 10% 的试样, 待自然风干到预定的含水率后, 放入保湿缸中养护数日, 使水分均匀。

为研究不同固结应力比和围压对压实黄土动力特性的影响, 试验采用 2 种固结应力比, 即 $K_c = 1.0$ 或 1.5; 围压压力分别为 100, 200, 300, 400 kPa。试样在均压或偏压状态下进行固结, 固结完成的标准取轴向变形不超过 0.01 mm/h。固结完成后, 关闭排水阀, 然后进行振动试验, 振动频率为 1 Hz, 振动波形为正弦波。每一围压下, 动应力逐级增大, 但不超过轴向固结压力, 避免试样与底座或试样帽脱开。一般情况下, 每级动应力反复循环作用 1 000 或 3 000 次, 直至试样破坏。

2.3 试验数据的整理

整理动应力 - 应变关系时, 采用第 10 个循环的动应力与动应变值。试验过程中, 每个循环采集 20 个点, 这 20 个点中有一个在正弦波的波峰采集, 有一个在波谷采集。循环动应力为 $\sigma_d = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$, 动应变为 $\varepsilon_d = (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})/2$, 动弹性模量为 $E_d = \sigma_d / \varepsilon_d$ 。

阻尼比是土动力特性的一个重要指标, 土的阻尼比反映土在周期动荷载作用下, 动应力应变滞回圈表现为应变的滞后性。动力试验中, 通常对试样逐级施加动荷载, 选取有代表性的循环, 绘制该循环的应力 - 应变关系曲线即滞回曲线(圈), 如图 2 所示^[8]。滞回圈的面积代表相应的能量消耗,

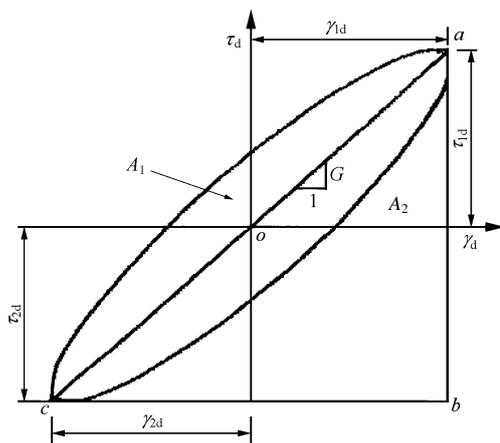


图 2 理想的应力 - 应变滞回圈^[8]
Fig.2 Idealized stress-strain hysteresis loop^[8]

周期性动荷载在一次循环中消耗的能量与该循环中最大剪应变对应的势能之比即阻尼比, 其计算公式为

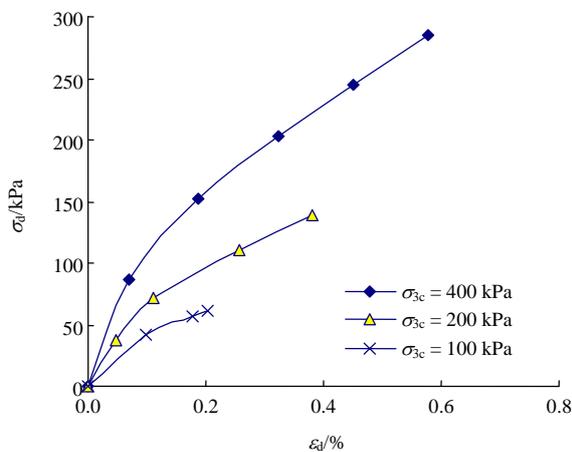
$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{A_1}{A_2} \tag{1}$$

式中: λ 为阻尼比, A_1 为滞回圈的面积, A_2 为三角形的面积。

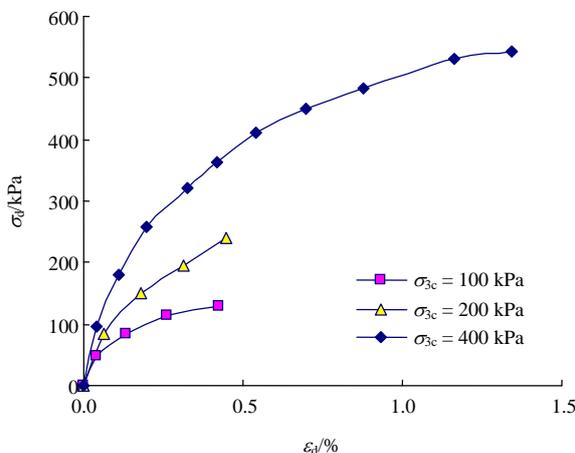
3 试验成果及分析

3.1 压实黄土的动应力 - 动应变关系

$\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ 时动应力 - 动应变曲线如图 3 所示。图 3(a), (b) 为含水量 $w = 16\%$ 条件下, 固结比 $K_c = 1.0$ 或 1.5 时, 压实黄土在不同固结压力下的动应力 - 应变曲线。由图可见, 曲线随固结压力的增加而向上移动, 同时随固结比的增加曲线也向上移动, 为应变硬化性曲线。图 3(c), (d) 为固结压



(a) $w = 16\%$, $K_c = 1.0$



(b) $w = 16\%$, $K_c = 1.5$

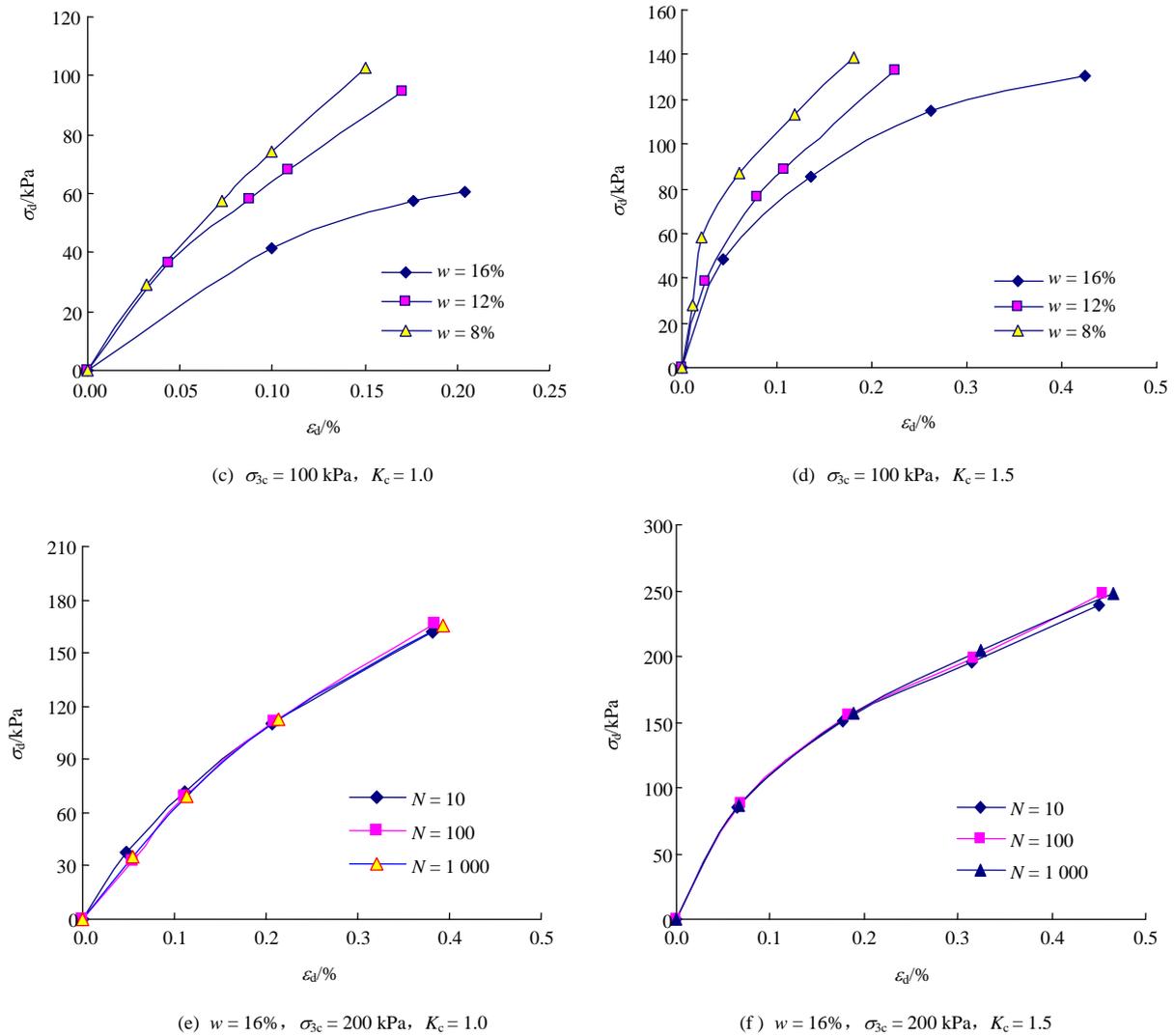


图3 $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ 时动应力 - 动应变曲线
Fig.3 Dynamic stress-strain curves when $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$

力 $\sigma_{3c} = 100 \text{ kPa}$ 时，在不同的含水率条件下动应变随着动应力的变化曲线，其曲线变化形态与图 3(a)，(b)十分相似。

图 3(e)与(f)是试样在不同振次 N 下的动应力与动应变曲线，可以看出，曲线形态与图 3(a)~(d)中的曲线形态十分相似，并且在不同的振次下关系曲线中散点的分布基本相同。这表明干密度较大的试样对于某一动应力循环作用次数的影响不敏感。究其原因，主要是因为试样的干密度较大，在固结压力与动应力相对较小的情况下，试样的变形主要为弹性变形。

另外，从图 3 还可以看出，在相同固结压力，不同固结应力比的条件下，试样产生相同动应变所需要的动应力不相同，偏压状态下所需的动应力较均压状态所需的动应力大，并且两者动应力的比

值随着动应变的增加而逐渐减小，这主要是初始剪应力使试样进一步密实，土粒间的滑动变得相对困难所导致的；固结压力相同时，动应力增加，试样受到的剪应力逐渐增大，初始剪应力对试样变形影响的效应显得逐渐减弱，致使产生相同动应变时，两者所需动应力趋于接近。

由图 3 可知，上述各条件下的压实黄土的动应力 - 动应变曲线近似为双曲线， $1/E_d - \epsilon_d$ 关系符合直线关系，其表达式为

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{a+b\epsilon_d} = \frac{\epsilon_d}{1/E_0 + \epsilon_d/\sigma_{dmax}} \quad (2)$$

也可表示为

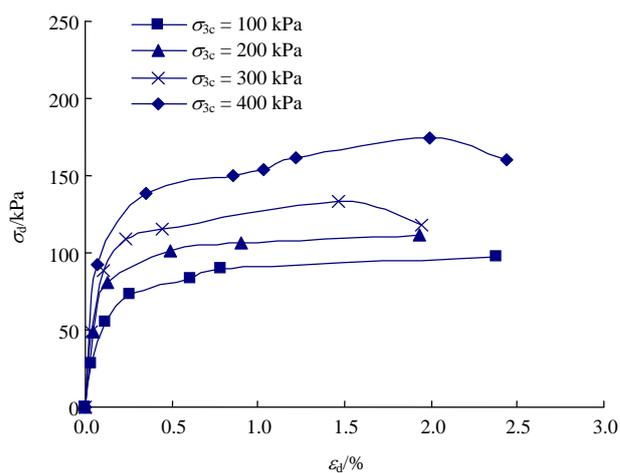
$$E_d = \frac{E_0}{1 + \epsilon_d E_0 / \sigma_{dmax}} \quad (3)$$

式中: a, b 均为试验参数, 分别为 $1/E_d - \varepsilon_d$ 关系直线的截距和斜率; E_0, σ_{dmax} 分别为起始动弹性模量和最大动应力, $E_0=1/a, \sigma_{dmax}=1/b$ 。研究表明, 压实黄土的动本构关系在研究范围内, 无论压实黄土的干密度多大, 它的动本构关系基本不变, 只是本构模型的参数 a, b 值随干密度不同而变化^[3, 9~11]。

需指出的是, 有学者将黄土按起始含水量 w_0 不同, 根据缩限(w_p)和液限(w_L)划分为干型黄土($w_0 < w_p$)、湿型黄土($w_p < w_0 < w_L$)和饱和黄土($w_0 > w_L$)。3 种类型的黄土动本构关系、动强度和动变形等有明显的差异。

实际上, 对于压实黄土的动应力 - 应变关系曲线的形态受多种因素的影响。压实黄土的动应力 - 动应变关系曲线只有在固结压力、含水率与产生的动应变等在特定条件下, 动应力 - 应变关系曲线才近似为双曲线; 当试样的受力状态、含水率或产生的动应变较大时, 应力 - 应变关系曲线则不符合此种关系。为验证此现象, 在试验过程中, 对干密度为 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 的试样进行配水, 将其含水率控制为 20%, 然后进行动三轴试验, 试验方法与上述试验方法相同, 最终得到动应力 - 动应变曲线如图 4 所示, 从图中可以看出, 当试样固结压力较小时, 其动应力与动应变关系曲线近似为双曲线型, 随着固结压力的增加, 该关系曲线呈现明显动应力峰值, 当动应变进一步增加时, 动应力则逐渐减小, 关系曲线属于应变软化型。

$\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$, 含水率为 $w = 16\%$ 的试样在不同的固结压力下, 经上述试验方法测定, 式(1)中试验参数 a 与 b 取值如表 2 所示。



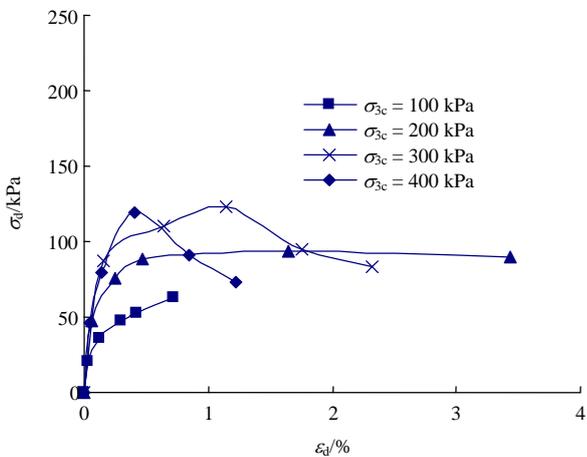
(b) $w = 20\%, K_c = 1.5$

图 4 $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ 时不同围压下动应力 - 动应变曲线
Fig.4 Dynamic stress-strain curves under different confining pressures when $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$

表 2 不同固结应力比和固结应力下干密度 $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ 时 a 与 b 的值

Table 2 Values of a and b under different consolidation stresses and consolidation stress ratios when $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$

固结应力比 K_c	固结应力 /kPa	$w = 16\%$		
		$a/10^2$	$b/10^2$	$E_0/(10^2 \text{ kPa})$
1.0	100		0.003 5	
	200	0.001 20	0.002 6	833.3
	300	0.000 70	0.002 0	1 428.6
	400	0.000 90	0.001 9	1 111.1
1.5	100	0.000 70	0.005 5	1 428.6
	200	0.000 60	0.002 9	1 666.7
	300	0.000 50	0.002 1	2 000.0
	400	0.000 45	0.001 5	2 222.2



(a) $w = 20\%, K_c = 1.0$

3.2 动弹性模量

动弹性模量是反映土体动力特性的重要参数, 为了比较不同干密度、不同围压、不同含水量与固结比的条件下, 压实黄土动弹性模量的变化规律, 进行了相关试验, 动弹性模量 E_d - 动应变 ε_d 曲线如图 5~7 所示。

经试验分析可知: 不同干密度下, $E/E_0 - \varepsilon_d$ 随应变变化的趋势是相同的, 其关系曲线可近似用下式表示:

$$\frac{E}{E_0} = 1 + A \left(\frac{\varepsilon_d}{B + C\varepsilon_d} \right) \quad (4)$$

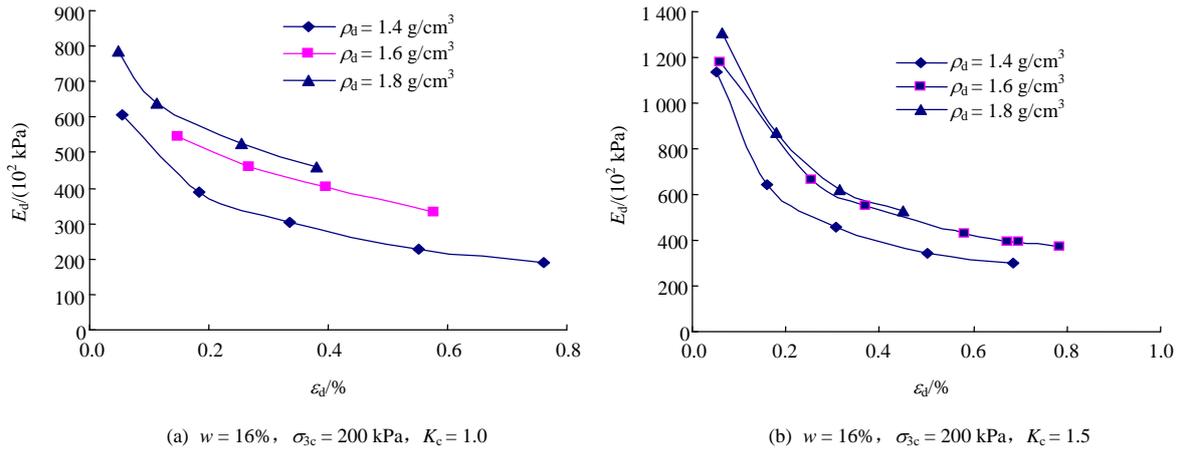


图5 不同干密度下动弹性模量 E_d - 动应变 ϵ_d 曲线
 Fig.5 Dynamic elastic modulus strain curves under different dry densities

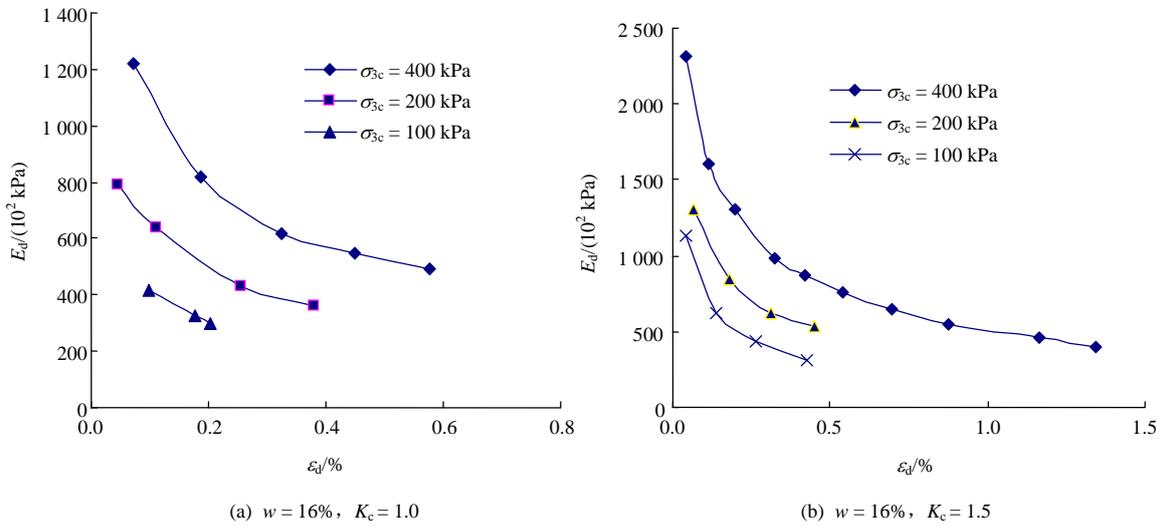


图6 不同围压下动弹性模量 E_d - 动应变 ϵ_d 曲线
 Fig.6 Dynamic elastic modulus vs. dynamic strain curves under different confining pressures

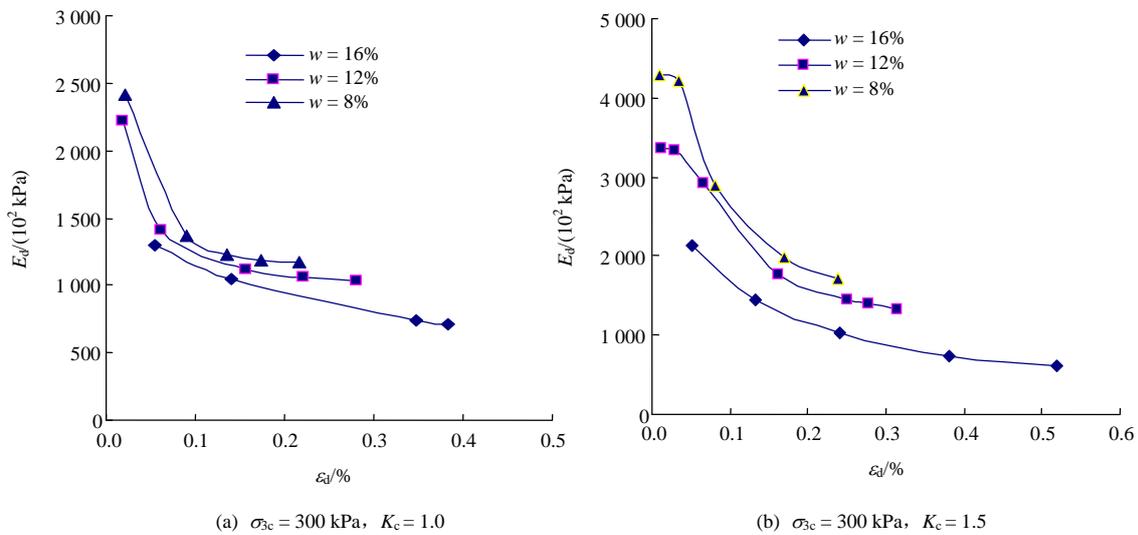


图7 不同含水量下动弹性模量 E_d - 动应变 ϵ_d 曲线
 Fig.7 Dynamic elastic modulus vs. dynamic strain curves under different moisture contents

式中: A , B 与 C 均为试验参数。

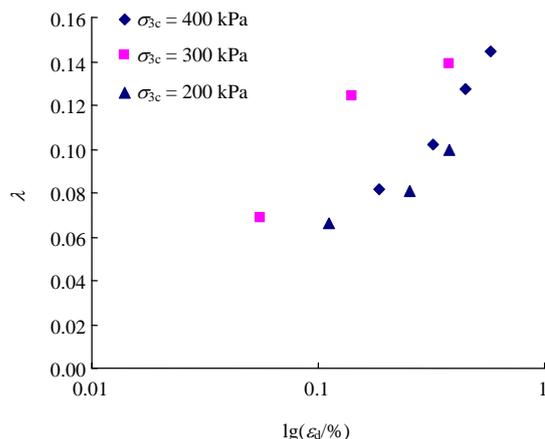
经试验验证, 该模型用于不同干密度的压实黄土试样, 相关系数大于 0.973。这说明压实黄土的 $E/E_0 - \varepsilon_d$ 曲线都以相同放的模式随干密度变化。因此, 干密度对压实黄土 $E/E_0 - \varepsilon_d$ 关系曲线形态没有明显的影响。这意味着, 黄土经压实处理后除了提高黄土的初始动弹性模量外, 同原状黄土相比, 非线性特性也明显增强^[2, 12, 13]。

由图 6, 7 可知: 首先, 黄土的动弹性模量随应变的增大而减小, 但随应变的增大而减小的速度越来越小, 当动应变 ε_d 从 0.000 增加到 0.002 左右时, $E_d - \varepsilon_d$ 曲线比较陡, 也就是减小的速度比较大, 而 $\varepsilon_d > 0.002$ 以后则变得平缓; 当 $\varepsilon_d \rightarrow \infty$ 时, 动弹性模量减小的速度越来越小, 近似平行于 ε_d 轴。其次, $K_c = 1.5$ 时, 试件振动前承受了初始剪应力, 干密度有所增加, 土体骨架趋于稳定结构, 导致初始模量增加, 同等条件下, 偏压状态下的动弹性模量比均压状态下大 50%。再者, 固结压力与干密度越大, 含水量越小, 则动弹性模量越大, 并在较大范围内具有近似直线关系。这主要是因为随着动应力幅的增加, 试样进入屈服状态, 塑性变形发展加快的缘故, 如果继续增大动应力, 则只需要较小的动应力试样即有可能发生破坏。

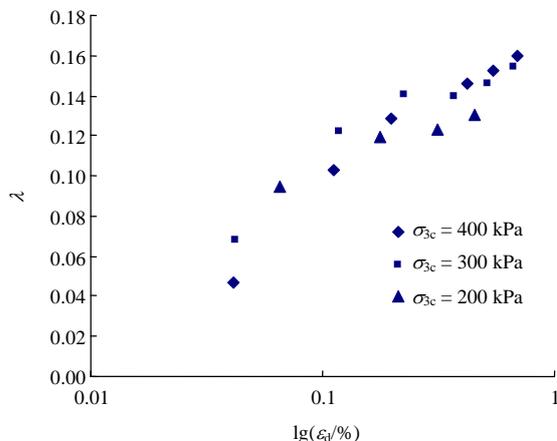
3.3 阻尼比

土的阻尼比反映土在周期性动荷载作用下, 动应力 - 应变关系滞回圈表现出的滞后性。它是由土体变形时内摩擦作用消耗能量造成的, 反映动荷载作用下能量因土的内部阻力而损失的性质, 是土动力特性的一个重要性质。土在周期性动荷载作用下的变形包括弹性变形和塑性变形 2 个部分, 动应力较低时显示弹性, 随着动应力的增加塑性变形逐渐发展, 动应力 - 动应变关系显示出非线性和应变的滞后性特点。影响阻尼比的因素有多种, 据统计, 多达 15 种, 其中主要影响因素有动应力幅、平均有效应力、孔隙比、荷载振动次数, 此外还有固结比、土体结构特性、荷载振动频率等^[8, 12, 14]。本文着重研究了初始应力状态、固结应力比及干密度对阻尼比的影响。

图 8 为不同围压下阻尼比与动应变曲线, 从图中可以看出, 压实黄土的阻尼比随着动应变的增大而交错分布, 总体上呈缓慢增大的趋势, 表明阻尼比虽然受到固结比与固结压力的影响, 但是阻尼比



(a) $w = 16\%$, $K_c = 1.0$

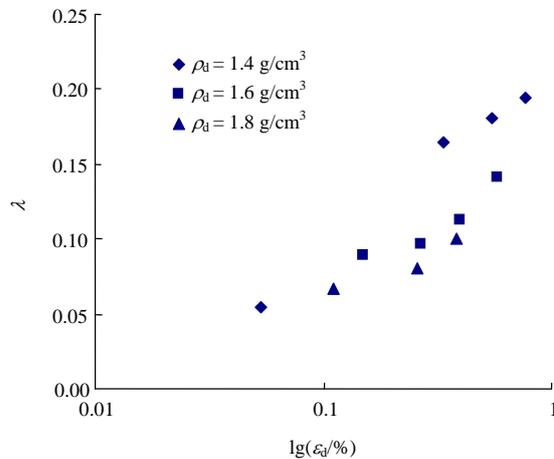


(b) $w = 16\%$, $K_c = 1.5$

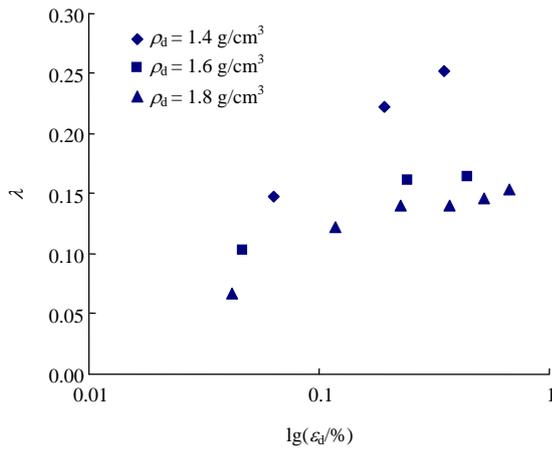
图 8 不同围压下阻尼比与动应变曲线

Fig.8 Damping ratio-strain curves under different confining pressures

的试验点分布在较窄的范围。图 9 为不同干密度下阻尼比与动应变曲线。由图可见, 阻尼比同样随着动应变的增大而增大, 同时压实黄土的干密度越大, 所对应的阻尼比越小。同固结比与固结压力相比,



(a) $w = 16\%$, $\sigma_{3c} = 200 \text{ kPa}$, $K_c = 1.0$



(b) $w = 16\%$, $\sigma_{3c} = 200 \text{ kPa}$, $K_c = 1.5$

图9 不同干密度下阻尼比与动应变曲线

Fig.9 Damping ratio-strain curves under different dry densities

土体的干密度对压实黄土阻尼比的影响较为显著。

从阻尼比与动应力和动应变的关系散点图可知，阻尼比随着动应变的增加而增加，变化的规律比较复杂，两者之间的关系比较离散，看不出明显的规律。鉴于阻尼比在动力分析中的重要性，许多学者对其进行了研究，甚至提出了一些计算阻尼比的不同方法，但到目前为止尚未获得较好的规律性，但一般认为：

(1) 阻尼比随动应变的增大而增大，达到某一幅值后曲线变缓，趋于一个常值。

(2) 影响黄土的阻尼比的因素很多，包括振幅、有效平均主应力、孔隙比、循环周数、饱和度、超固结比、八面体剪应力、有效围压、振动频率的时间效应、颗粒大小和形状矿物成分的结构性等因素，其中以剪应变振幅、有效平均主应力、孔隙比及土结构性的影响最大。

目前，黄土阻尼特性难以得到较好规律的原因是由于黄土动三轴试验测定方法主要存在 2 个缺陷：一是含水量较低的黄土与饱和黏土和砂土不同，它在动荷载作用下的影响范围是由顶部逐渐向下发展的，而下部基本不变，因此，按全部试样高度计算变形自然和实际不符。阻尼比的计算，仅仅是研究循环荷载作用下的一个周期，应变增量很小，这些因素可能是导致阻尼测试结果离散性较大的原因。二是进行动三轴试验时，试样在固结状态完成后，当施加的动应力较大时，由于压实黄土的变形对力的反应不敏感，试样在拉半周势必出现与活塞脱离，从而使位移传感器测定的变形值比实际大，

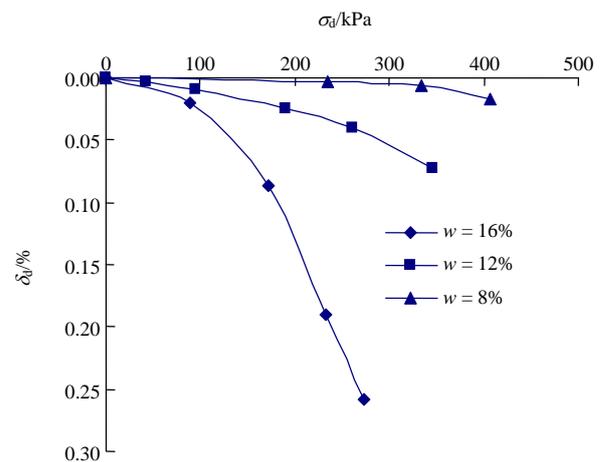
进而导致测定的阻尼比呈现明显的不规律性^[8]。

3.4 振陷变形

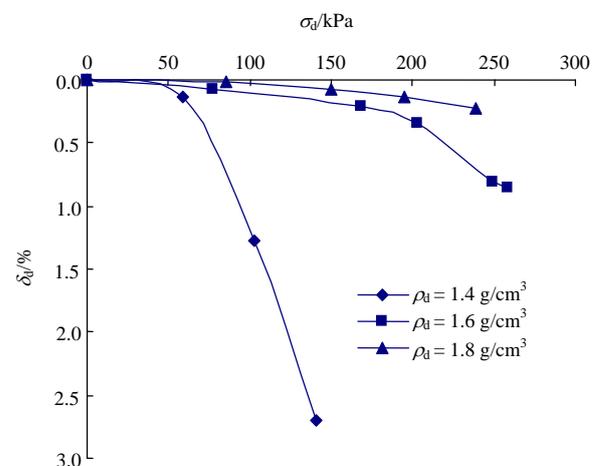
在大动荷时，振陷是一个比较突出的问题，压实黄土的振陷变形在土动力学上是用残余应变来表示的^[7, 8]，其定义为施加的动应力作用停止后土残留的附加应变值，常用动应力作用前后试样高度差与动应力作用前试样高度之比来表示，与振动次数 N 密切相关，其公式为

$$\varepsilon_p(N) = \frac{h - h(N)}{h} \quad (5)$$

式中： $\varepsilon_p(N)$ 为动应力往返作用 N 次所产生的残余应变； h ， $h(N)$ 分别为动应力作用前和作用 N 次后试样的高度。本文中的残余应变 ε_p 一律用振陷系数 δ_d 表示。动三轴试验用等效的正弦循环荷载进行。试验中振动频率为 1 Hz，取固结比 $K_c = 1.5$ ，分别分析了干密度、含水量与振动次数下压实黄土的振陷特性，试验结果如图 10，11 所示。



(a) $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_{3c} = 200 \text{ kPa}$



(b) $w = 16\%$, $\sigma_{3c} = 200 \text{ kPa}$

图 10 不同含水率与干密度下压实黄土振陷曲线

Fig.10 Curves of vibration deformation in compaction loess under different moisture contents and dry densities

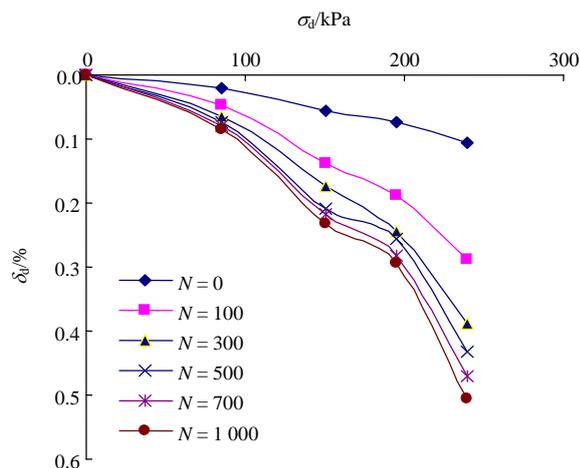


图 11 不同振次下压实黄土振陷曲线

Fig.11 Curves of vibration deformation in compaction loess under different cyclic numbers

由图 10(a)可知,在初始应力状态相同时,含水率对黄土的振陷变形有明显的影响,表现为含水量增大,在同一动应力下对应的振陷系数也增大。含水量较小时,黄土的振陷变形与动应力在较大范围内表现为近似直线关系,随着含水量的增加,振陷变形曲线的非线性特征愈来愈明显,振陷变形也急剧发展,甚至破坏,产生同样的振陷变形,所需动应力也愈来愈小。同一含水率时,振陷变形随动应力的增大而增大,试样在较小的动应力作用下,振陷变形增加较小,近于直线变化,当动应力增加至某一界限值时,振陷变形呈非线性急剧增长,直至破坏。有学者将这一界限动应力值定义为振陷的临界动应力 σ_{dcr} ^[15],并且振陷临界动应力随着含水量的增加而减小。

由图 10(b)可见,随着干密度的增加,振陷变形减小,振陷临界动应力增大。当将干密度由 1.4 g/cm^3 提高到 1.6 g/cm^3 时,土的振陷变形明显减小,而将干密度由 1.6 g/cm^3 提高到 1.8 g/cm^3 时,振陷变形减小较小,原因是干密度为 1.4 g/cm^3 时,土还较松,孔隙比较大,振动密实空间较大,而干密度为 1.6 g/cm^3 时,土相对已较紧,振动密实空间小所致。

一般规定,振陷临界动应力是振陷系数(或残余应变)为 0.015 对应的动应力。黄土振陷只有超过临界动应力才可能明显发生^[13]。但由图 10 可知,压实黄土的含水率及其干密度对振陷系数都有着重要的影响,且振陷系数未达 0.015 时,振陷系数

增大的速度已交迅速,表明振陷系数变化规律与试样含水率及干密度有着密切关系。因此,路基施工中,黄土填料在最佳含水率的前提下压实到规范要求的干密度,对控制路基的工后累积沉降非常重要^[16]。

由图 11 可见,随着振动次数的增加,振陷变形逐步增大,但增大的速度随着振动次数的增加而逐渐减小,并随着动应力的增加趋于破坏。这表明路基的工后沉降主要发生在通车后的初期,在车辆荷载长期作用下,路基土逐渐变得密实,工后沉降逐渐减小。

4 结 论

在大量三轴试验的基础上,本文分析了在不同干密度、含水率、固结比、固结围压及不同振动次数等对压实黄土动力特性的影响,所得结论对分析压实黄土路基在车辆荷载作用下的工作原理有一定参考价值。具体结论如下:

(1) 路基压实黄土在一定条件下的动应力 - 动应变关系符合双曲线模型,干密度对动应力 - 动应变关系曲线的形态影响甚小,只需调整模型中试验参数即可。在相同的围压下,由于初始剪应力的影响,达到相同的动应变,偏压固结状态下比均压状态所需的动应力大。

(2) 压实黄土的动弹性模量随着动应变的增加而减小,且减少的幅度随应变的增加逐渐减少;其他条件相同的条件下,固结围压愈大,干密度越大或含水率越小时,动弹性模量越大,其中初始应力状态相对其他因素而言对动弹性模量影响最为显著。固结应力比、周围压力、干密度、动应力等因素对非饱和黄土的阻尼比均有影响,可以综合反映在阻尼比与动应变关系发展的趋势中,且阻尼比离散性较大,阻尼比值一般为 0.2~0.3。

(3) 同其他因素相比,含水量与干密度对路基土的振陷变形有明显的影响,初始应力相同的条件下,含水量愈大,干密度愈小,则振陷系数愈大,振陷曲线的非线性特征也愈明显。动应力较小时,振陷变形近似线性增长,当动应力增加到一定程度时,超过其临界值时,振陷变形呈非线性急剧增长,甚至破坏。

参考文献(References):

- [1] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.(XIE Dingyi. Soil dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.(in Chinese))
- [2] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.(WANG Lanmin. Loess dynamics[M]. Beijing: Earthquake Press, 2003.(in Chinese))
- [3] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1997.(LIU Zudian. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.(in Chinese))
- [4] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3 - 13.(XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3 - 13.(in Chinese))
- [5] 景宏君, 张 斌. 黄土地区公路路基冲击压实试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(1): 25 - 29.(JING Hongjun, ZHANG Bin. Experiments of highway subgrade impact compaction in loess region[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science), 2004, 24(1): 25 - 29.(in Chinese))
- [6] 陈存礼, 杨 鹏, 何军芳. 饱和击实黄土的动力特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1 551 - 1 556.(CHEN Cunli, YANG Peng, HE Jufang. Research on dynamic characteristics of saturated compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1 551 - 1 556.(in Chinese))
- [7] 骆亚生, 谢定义, 董为民, 等. 不同地区黄土振陷变形特性的对比分析[J]. 陕西水利发电, 2001, 17(1): 4 - 7.(LUO Yasheng, XIE Dingyi, DONG Weimin, et al. Comparative analysis of the vibration deformation behavior of the loess from the different regions[J]. Journal of Shaanxi Water Power, 2001, 17(1): 4 - 7.(in Chinese))
- [8] 陈国兴, 谢君斐, 张克绪. 土的动弹性模量和阻尼比的经验估计[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(1): 73 - 84.(CHEN Guoxing, XIE Junfei, ZHANG Kexu. The empirical evaluation of soil modulus and damping ratio for dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(1): 73 - 84.(in Chinese))
- [9] 贺建清, 阳军生, 靳 明. 循环荷载作用下掺土煤矸石力学性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 199 - 205.(HE Jianqing, YANG Junsheng, JIN Ming. Experimental study on mechanical behaviors of coal gangue mixed with soil under cyclical loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 199 - 205.(in Chinese))
- [10] 田堪良, 张慧莉, 张伯平, 等. 动扭剪荷载作用下非饱和黄土动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 151 - 4 155.(TIAN Kanliang, ZHANG Huili, ZHANG Boping, et al. An experimental study on dynamic properties of unsaturated loess under dynamic torsional shear[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 151 - 4 155.(in Chinese))
- [11] 骆亚生. 非饱和黄土在动、静复杂应力条件下的结构变化特性及结构性本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1 959. (LUO Yasheng. Variation characteristics of soil structure and structural constitutive relation of unsaturated loess under static and dynamic complex stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1 959.(in Chinese))
- [12] 尚守平, 刘方成, 杜运兴, 等. 应变积累对黏土动剪模量和阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 683 - 688.(SHANG Souping, LIU Fangcheng, DU Yunxing, et al. Experimental study on effect of shear strain accumulation on dynamic shear modulus and damping ratio of clay soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 683 - 688.(in Chinese))
- [13] 梁仁旺, 栗润德. 黄土动力特性研究分析[J]. 山西建筑, 2003, 29(13): 22 - 23.(LIANG Renwang, LI Runde. Review of the research on dynamic characteristics of loess[J]. Shanxi Architecture, 2003, 29(13): 22 - 23.(in Chinese))
- [14] 柴华友, 崔玉军, 卢应发. 循环荷载下黄土特性模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 272 - 4 281.(CHAI Huayou, CUI Yujun, LU Yingfa. Simulation of loess behaviors under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 272 - 4 281.(in Chinese))
- [15] SEED H B, MARTIN P P, LYSMER J. Power water pressure changes during soil liquefaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, 102(GT4): 327 - 346.
- [16] 杨 超, 崔玉军, 黄茂松. 循环荷载下非饱和结构性黄土的损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 805 - 811.(YANG Chao, CUI Yujun, HUANG Maosong. Damage model for unsaturated structural loess under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 805 - 811.(in Chinese))