

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.10.004

煤渣改良土路基的动弹性模量及临界动应力试验研究

张向东, 任 昆

(辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为研究煤渣改良土作为路基填料在中低围压下的动力特性,以煤渣改良土作为研究对象,利用GDS动态三轴试验系统对不同围压及不同频率下煤渣改良土的动弹性模量以及临界动应力进行了室内试验研究。分析了不同围压及不同加载频率对煤渣改良土动弹性模量的影响,并据此建立了动弹性模量的衰减模型。根据临界动应力的不确定性,利用结构元方法,建立了煤渣改良土临界动应力的模糊线性回归模型。试验结果表明,煤渣改良土的动弹性模量随着加载次数的增加呈负指数关系下降;动弹性模量随围压的增加而逐渐增加,二者大致呈线性关系;动弹性模量随频率的增大而逐渐减小,当加载频率大于3 Hz后动弹性模量的下降速率有所减缓。所建立的衰减模型能够较好地反映出频率及围压对动弹性模量带来的影响。煤渣改良土的临界动应力与加载的频率呈负相关关系,低频的荷载对临界动应力的影响较大;临界动应力与围压之间表现出正相关关系。利用结构元方法所构建的模糊线性回归模型能够较好地反映临界动应力与频率及围压之间的关系,模型精度较高,可以为道路工程中的建设及其临界动应力的确定提供参考。

关键词:道路工程;动力特性;动三轴试验;煤渣改良土;模糊结构元

中图分类号: U416.25

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2018)10-0026-08

Experimental Study on Dynamic Elastic Modulus and Critical Dynamic Stress of Cinder Improved Soil Subgrade

ZHANG Xiang-dong, REN Kun

(School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of cinder improved soil as subgrade filler under medium and low confining pressure, taking cinder improved soil as the research object, the dynamic elasticity modulus and critical dynamic stress of improved soil under different confining pressures and frequencies are studied by laboratory experiment using GDS dynamic triaxial test system. The attenuation model of dynamic elastic modulus is established based on the analysis of the influence of different confining pressures and loading frequencies on the dynamic modulus. According to the uncertainty of the critical dynamic stress, a fuzzy linear regression model of critical dynamic stress of cinder improved soil is established by structural element method. The experiment result shows that (1) the dynamic elastic modulus of cinder improved soil decreases exponentially with the increase of loading times; (2) the dynamic modulus increases gradually with the increase of confining pressure, showing roughly linear relationship; (3) the dynamic modulus decreases gradually with the increase of frequency, the decline rate of dynamic modulus decreases when the loading frequency is more than 3 Hz, and the attenuation model can better reflect the influence of frequency and

收稿日期: 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978131); 高等学校博士学科点专项科研基金联合项目(20112121110004)

作者简介: 张向东(1962-),男,吉林榆树人,博士,教授,博士生导师。(jwd101@126.com)

confining pressure on the dynamic elasticity modulus; (4) the critical dynamic stress of cinder improved soil is negatively correlated with loading frequency, the low-frequency loads have a great influence on the critical dynamic stress; (5) there is a positive correlation between the critical dynamic stress and the confining pressure. The established fuzzy linear regression model based on the structural element method can better reflect the relationship among critical dynamic stress, frequency and confining pressure. It has higher accuracy and can provide a reference for the construction of road engineering and determination of critical dynamic stress.

Key words: road engineering; dynamic characteristics; dynamic triaxial test; cinder improved soil; fuzzy structural element

0 引言

路基作为道路工程中承受及传递荷载的主要结构,需要满足设计中强度、刚度、稳定性的要求。目前,改良土路基工程大多使用水泥或石灰改良土填筑,大量使用水泥及石灰会增大工程的成本,提高工程的造价。煤渣作为煤炭燃烧后的固体废弃物,其化学成分与粉煤灰相似。因为在燃烧过程中经历了不同的物理化学作用,最终形成了不同的产物,使得煤渣在回收利用方面低于粉煤灰^[1-2]。阜新地区煤矿资源丰富火力发电及冬季供暖需要大量煤炭。如果可以对废弃的煤渣加以利用,一方面可以降低工程的成本,另一方面可以降低废物处理对环境带来的破坏。

对于水泥改良土及石灰改良土的动特性,有许多学者进行了大量的研究。黄娟等^[3]研究了不同围压、固结比、加载频率对泥炭质土动变形的影响。张向东等^[4-5]对不同固结条件下,石灰粉煤灰改良风积土的动强度进行了分析。张泽林等^[6]通过循环加载试验对黄土和泥岩动弹性模量及阻尼比进行了试验研究。陈乐求等^[7]对循环加载条件下水泥改良粗粒土的动弹性模量及阻尼比进行了试验研究。周葆春等^[8]研究了石灰改良膨胀土临界动应力的影响因素及其发生脆性破坏的机理。刘钢^[9]将路基土塑性累积破坏分为:快速破坏、缓慢破坏、缓慢稳定和快速稳定4种形式,并给出了判断的数学模型。GUNAY^[10]、WERKMEISTER^[11]等人分析了动载作用下,粗颗粒土在含水率不同的情况下的累积变形规律。TRINH^[12]、Yasuhara^[13]等研究了土体在受到循环荷载作用时的动力特性,结果表明动载的作用次数对土体有较大的影响。王静^[14]、闫治利^[15]、张向东^[16]等也对不同类型土体的动力特性进行了研究。

目前,对于水泥及石灰改良土在中等围压下的研究较多,而将煤渣作为路基填料在较低围压下的

动力性能研究还亟待开展。对于临界动应力,主要以试验的方式来确定,一般由塑性累积应变曲线确定出临界动应力的一个大致范围^[17-19]。本研究利用GDS动三轴试验机,在中低围压条件下对煤渣改良土的动弹性模量及临界动应力进行了试验研究,并利用结构元方法的模糊线性回归^[20-21]对临界动应力进行了分析,提出了一种确定临界动应力的方法。

1 试验条件

1.1 试验材料及制备

试验中采用的土取自辽宁省阜新市某道路施工现场,其级配曲线如图1所示。煤渣为阜新市第五供热公司燃煤的废弃炉渣,经过破碎处理后取粒径小于2.36 mm的燃煤炉渣备用,其主要化学成分为 Al_2O_3 及 SiO_2 ,堆积密度为 921 kg/m^3 。水泥选用阜新某42.5级普通硅酸盐水泥。将 m (水泥): m (煤渣): m (风积砂)按照3:10:87的质量关系进行配比,所得土样最大干密度为 2.09 g/cm^3 ,最优含水率为8.73%。

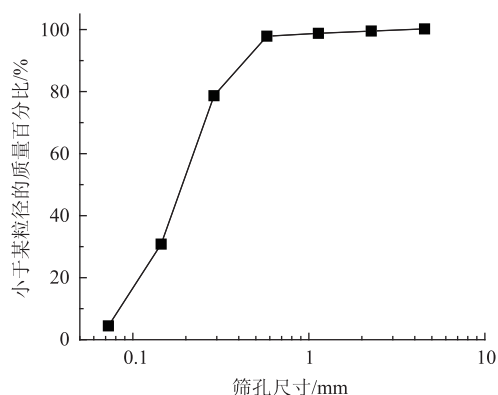


图1 风积砂的级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of aeolian sand

将试验中使用的土样搅拌均匀,在 $\phi 39.1 \times 80 \text{ mm}$ 的三瓣饱和器内分5层振捣压实。试样制备完成后,立即使用保鲜膜对试件进行包裹,放置在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度 $\geq 95\%$ 的标准养护环境下养护7 d,

之后对其动力特性进行试验分析。

1.2 试验方法

试验采用英国 GDS 动态三轴试验机开展, 该设备围压控制系统控制压力范围为 0 ~ 2 MPa, 最大轴向荷载 25 kN, 最大轴向位移 90 mm, 荷载频率为 0.1 ~ 5 Hz, 可以满足中低围压、高振次, 多种频幅的要求。

试验采用固结不排水的试验方法 (CU 试验), 为研究煤渣改良土路基临界动应力的影响因素, 根据周葆春^[8]、杨广庆^[22]等人的研究成果, 将动荷载的幅值设定为 110 ~ 310 kPa, 用以搜索临界动应力的范围。围压为 30 ~ 100 kPa, 频率为 1 ~ 5 Hz, 加载次数为 10 000 次, 采用正弦波的加载形式用以模拟不同车速下、不同深度处土体的动力特性。具体试验参数见表 1, 试验终止的条件为每小时变形小于 0.1 mm 或累计塑性应变超过 5%。前者认为变形已趋于稳定, 后者认为试件已发生破坏。

表 1 试验参数

Tab. 1 Testing parameters

试验组号	频率/Hz	围压/kPa	动应力幅值/kPa						
1	1	30	130	170	210	230	250	150	
2		50	180	200	220	250	270	150	
3		70	190	220	250	270	290	150	
4		100	230	250	270	300	310	150	
5	2	30	130	160	190	220	240	150	
6		50	170	190	210	230	250	150	
7		70	180	200	220	240	260	150	
8		100	180	210	240	270	290	150	
9	3	30	110	140	170	200	220	150	
10		50	130	160	190	220	240	150	
11		70	170	190	210	230	250	150	
12		100	170	200	230	250	270	150	
13	5	30	120	140	160	180	200	150	
14		50	110	140	170	200	220	150	
15		70	130	160	190	210	230	150	
16		100	180	200	220	240	260	150	

2 试验结果与分析

2.1 动弹性模量

由于动荷载的周期性作用, 使得动应力和动应变之间表现出一系列的滞回曲线, 其示意图如图 2

所示, 动弹性模量按式 (1) 计算。

$$E_d = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}, \tag{1}$$

式中, $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$, $\varepsilon_{\max}$, $\varepsilon_{\min}$ 分别为滞回曲线中应力应变所对应的最大值与最小值。

随着荷载次数的增加, 动弹性模量逐渐出现下降趋势, 图 3 和图 4 分别为不同频率及不同围压下, 动弹性模量随振动次数的变化规律。由于文章篇幅有限, 仅列出在动载幅值为 150 kPa 下, 围压及频率分别为 50 kPa 和 2 Hz 情况下动弹性模量的变化规律。

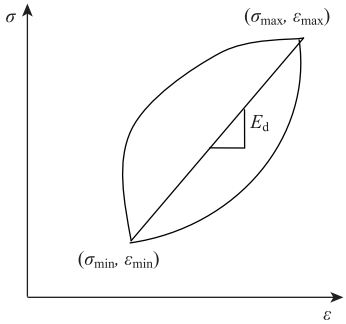
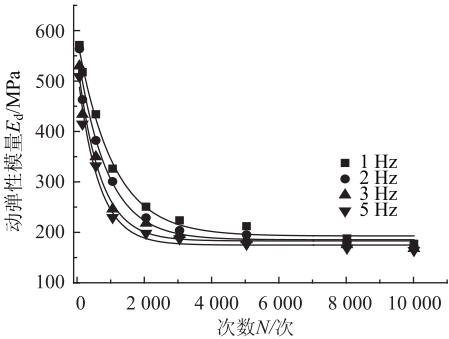
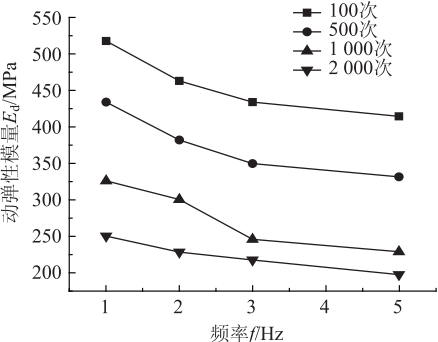


图 2 滞回曲线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hysteresis curve



(a) 动弹性模量与加载次数的关系

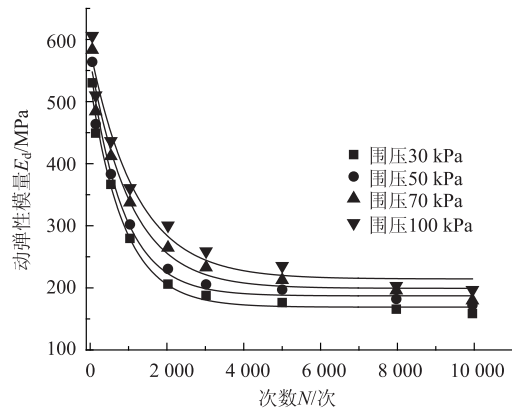


(b) 动弹性模量与频率的关系

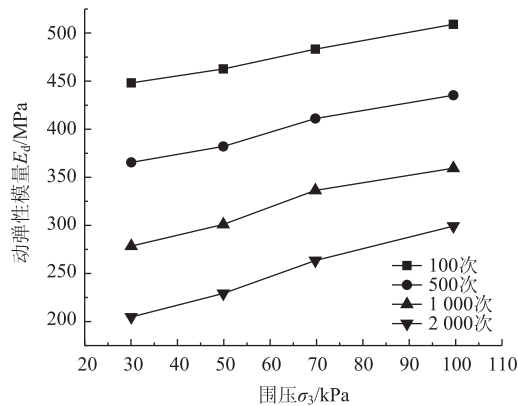
图 3 围压为 50 kPa 时不同频率下动弹性模量的变化

Fig. 3 Dynamic elastic modulus varying with frequency under 50 kPa confining pressure

通过图 3 和图 4 不难发现, 动弹性模量随着加载次数的增加而逐渐减小, 在荷载施加的最初阶段下降



(a) 动弹性模量与加载次数的关系



(b) 动弹性模量与围压的关系

图 4 频率为 2 Hz 时不同围压下的动弹性模量衰减

Fig. 4 Attenuation of dynamic elastic modulus under different confining pressures at 2 Hz frequency

明显,而后期趋于稳定,二者大致呈指数关系,动弹性模量的衰减模型见式(2),模型参数如表2所示。

$$E_d = Ae^{-N/B} + C, \quad (2)$$

式中, E_d 为动弹性模量; N 为加载次数; A , B , C 为模型参数。

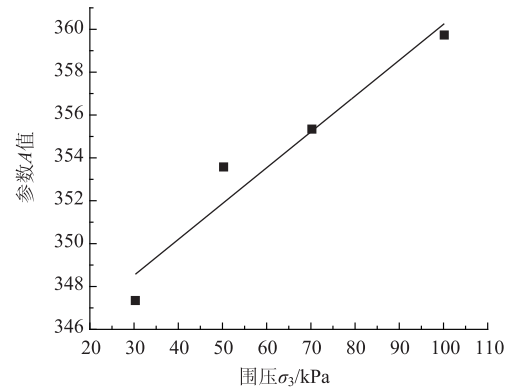
表 2 模型参数

Tab. 2 Model parameters

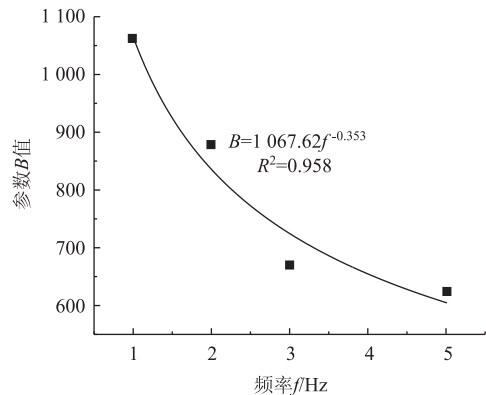
试验组号	A	B	C	R^2
5	166.41	347.31	879.96	0.991
6	184.76	353.56	877.63	0.983
7	197.00	355.33	1 080.28	0.979
8	212.31	359.73	1 213.86	0.976
2	192.4	374.16	1 060.69	0.994
10	182.5	330.33	670.05	0.981
14	174.24	319.63	624.36	0.984

此外由图3和图4还可以看出,在围压一定的情况下,动弹性模量随着加载频率的提高而逐渐降低,当加载频率大于3 Hz后动弹性模量的下降速率

有所减缓。当频率由1 Hz增大到3 Hz时,动弹性模量下降了18.4%,而频率从3 Hz提高到5 Hz,动弹性模量仅下降了5.2%。当频率一定的情况下,动弹性模量随着围压的增加而增加,二者大致呈线性关系。由此可以说明频率、围压都会对动弹性模量产生影响,但频率的影响是有限的,这与式(2)中 A , B 系数的变化规律相似。因而,对所得拟合参数再次进行分析,结果发现参数 A 与围压之间呈线性关系,而参数 B 与频率之间呈幂函数关系,这也与上述试验现象相互印证,当 B 值超过一定范围时对动弹性模量的影响逐渐减弱;而随着 A 值的增加动弹性模量则呈现出线性增加态势,其拟合曲线及方程如图5所示,说明本研究所建立的动弹性模量衰减模型是较为准确的。



(a) 参数A的拟合



(b) 参数B的拟合

图 5 参数 A 、 B 与围压及频率的关系Fig. 5 Relationship of parameters A , B with confining pressure and frequency

行车速度的提高会增大荷载的作用频率对路基产生的不良影响,但随着车速的逐渐提高这种影响也开始逐渐趋于稳定。适当增加路基填筑高度可以提高路基改良土的围压,从而减小小行荷载给路基结构带来的影响。

2.2 临界动应力

路基土体在车辆荷载的作用下不断重复着加载卸载的过程,每一次加载都将产生可恢复弹性变形以及不可恢复的塑性变形,随着次数的增加塑性变形逐渐累积,进而给路基土造成破坏。改良土累积塑性应变与加载次数的关系如图6所示。

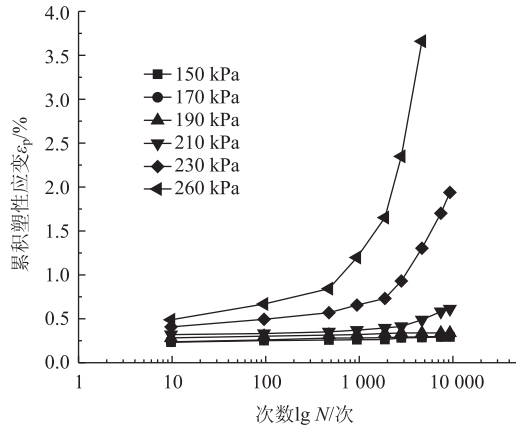


图6 围压 50 kPa 频率 2 Hz 下累积塑性变形与加载次数的关系

Fig. 6 Relationship between cumulative plastic deformation and loading times under 50 kPa confining pressures at 2 Hz frequency

通过图6可以看出,当动应力较小时,土体基本处在弹性状态下,所产生的塑性应变很小;当动应力超过某一限值时累积塑性应变会急剧地增加,直至土体发生剪切破坏。累积塑性应变曲线大致可以分为3种类型,即:稳定型、临界型和破坏型。

存在着一个临界动应力,当外荷载的动应力水平低于临界动应力时,累积塑性变形随着加载次数的增加而缓慢增加,应变的发展速率不断减小直至趋近稳定;当外荷载动应力水平超过临界动应力时,累积塑性应变随循环加载次数持续增长且应变增长率逐渐增大直至土样发生剪切破坏,即临界动应力一定介于稳定型与破坏型加载曲线所对应的应力范围之间。由图6可以确定煤渣改良土路基的临界动应力在210~230 kPa之间,约为220 kPa。

图7和图8分别给出了临界动应力随频率以及围压的变化关系。从图7可以看出临界动应力随着围压的增加而增加,二者大致呈现出线性关系,表明适当地提高路基填筑高度可以提高路基结构的稳定性。通过图8可以发现,随着加载频率的提高临界动应力出现下降趋势,在1~3 Hz范围内临界动应力的下降较快,3~5 Hz内临界动应力的下降速率

开始逐渐降低。当频率从1 Hz增大到3 Hz时临界动应力约下降16.2%,当频率由3 Hz增大到5 Hz时,临界动应力约下降8.4%。

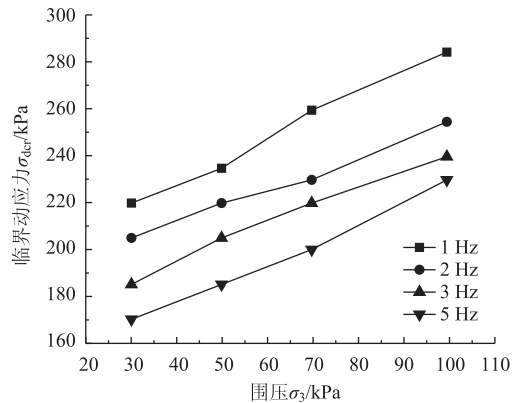


图7 临界动应力与围压的关系

Fig. 7 Relationship between critical dynamic stress and confining pressure

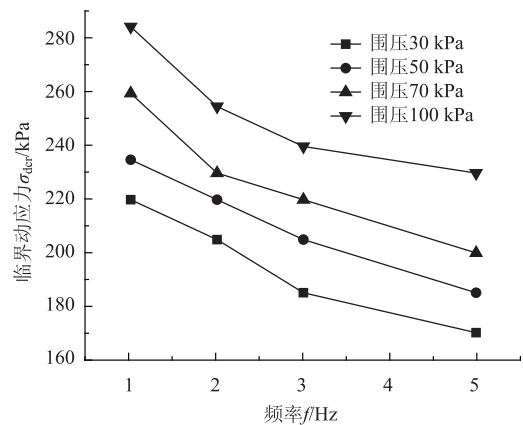


图8 临界动应力与频率的关系

Fig. 8 Relationship between critical dynamic stress and frequency

上述临界动应力确定都是根据累积塑性应变与加载次数曲线而得出的一个估计值,由于临界动应力的不确定性,本研究将围压及加载频率作为准确输入数据;将所得到的临界动应力作为模糊输出数据,利用结构元方法的模糊线性回归^[18]进行以下分析。

将试验所得数据作为部分模糊的已知数据 $(x_i, \tilde{y}_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。为方便计算,设试验中测得的模糊数据为三角模糊数, t 为结构元参量。其对应结构元的隶属度函数 $E(t)$ 为:

$$E(t) = \begin{cases} 1+t & t \in [-1, 0] \\ 1-t & t \in [0, 1] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

利用含有模糊系数的线性回归模型进行回归分析, 则有:

$$\tilde{y}_i = \tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2 x_{2i} + \cdots + \tilde{\alpha}_k x_{ki} + u_i, \quad (4)$$

式中, x_i 为准确试验数据, $\tilde{y}_i$ 为模糊试验数据, $\tilde{\alpha}_i$ 为模糊回归系数 ($\tilde{\alpha}_i$ 指的是 $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \cdots, \tilde{\alpha}_k$); u_i 为残差。

将式 (4) 改写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \\ \vdots \\ \tilde{y}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{21} & x_{31} & \cdots & x_{k1} \\ 1 & x_{22} & x_{32} & \cdots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{2n} & x_{3n} & \cdots & x_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\alpha}_1 \\ \tilde{\alpha}_2 \\ \vdots \\ \tilde{\alpha}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}. \quad (5)$$

$$Y = X\tilde{\alpha} + U, \quad (6)$$

式中, $X, \tilde{\alpha}, U$ 分别为对应的矩阵。

$$(X \text{ 为 } \begin{bmatrix} 1 & x_{21} & x_{31} & \cdots & x_{k1} \\ 1 & x_{22} & x_{32} & \cdots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{2n} & x_{3n} & \cdots & x_{kn} \end{bmatrix}; \tilde{\alpha} \text{ 为 } \begin{bmatrix} \tilde{\alpha}_1 \\ \tilde{\alpha}_2 \\ \vdots \\ \tilde{\alpha}_n \end{bmatrix}; U \text{ 为 } \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}).$$

由式 (4) 得其残差平方和为:

$$\begin{aligned} u^2 &= \sum_{i=1}^n u_i^2 = \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - (\tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2 x_{2i} + \cdots + \tilde{\alpha}_k x_{ki}))^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n \int_{-1}^1 E(t) (g_i(E) - (\tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2 x_{2i} + \cdots + \tilde{\alpha}_k x_{ki}))^2 dt = \\ &= \int_{-1}^1 E(t) \sum_{i=1}^n (g_i(E) - (\tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2 x_{2i} + \cdots + \tilde{\alpha}_k x_{ki}))^2 dt, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $g_i(E)$ 为三角模糊数, $\tilde{y}_i = g_i(E)$ 。

根据回归理论可得:

$$\tilde{\alpha} = (X^T X)^{-1} X^T \tilde{Y}. \quad (8)$$

由结构元原理可得隶属度函数为:

$$\mu_{\tilde{\alpha}}(t) = [(X^T X)^{-1} X^T \tilde{Y}^{-1}(t)]. \quad (9)$$

由于模糊数采用三角模糊数的形式, 可知:

$$\alpha_1(t) = a_1 + b_1 t$$

$$\alpha_2(t) = a_2 + b_2 t,$$

$$\alpha_0(t) = a_0 + b_0 t,$$

$$\begin{aligned} \text{式中, } a_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n x_{2i} p_i \sum_{i=1}^n x_{3i}^2 - \sum_{i=1}^n x_{3i} p_i \sum_{i=1}^n x_{2i} x_{3i}}{\sum_{i=1}^n x_{2i}^2 \sum_{i=1}^n x_{3i}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{2i} x_{3i})^2}, \\ b_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n x_{2i} q_i \sum_{i=1}^n x_{3i}^2 - \sum_{i=1}^n x_{3i} q_i \sum_{i=1}^n x_{2i} x_{3i}}{\sum_{i=1}^n x_{2i}^2 \sum_{i=1}^n x_{3i}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{2i} x_{3i})^2}, \end{aligned}$$

$$a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_{3i} p_i \sum_{i=1}^n x_{2i}^2 - \sum_{i=1}^n x_{2i} p_i \sum_{i=1}^n x_{2i} x_{3i}}{\sum_{i=1}^n x_{2i}^2 \sum_{i=1}^n x_{3i}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{2i} x_{3i})^2},$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_{3i} q_i \sum_{i=1}^n x_{2i}^2 - \sum_{i=1}^n x_{2i} q_i \sum_{i=1}^n x_{2i} x_{3i}}{\sum_{i=1}^n x_{2i}^2 \sum_{i=1}^n x_{3i}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{2i} x_{3i})^2},$$

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i - a_1 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{2i} - a_2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{3i},$$

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i - b_1 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{2i} - b_2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{3i}.$$

则将本试验中所得到的试验数据表示为三角模糊数 $\tilde{y}_i = p_i + q_i E$ 的形式, p_i 为模糊数的可能性最大值; q_i 为模糊数的范围。结果如表 3 所示。

表 3 临界动应力模糊数据

Tab. 3 Critical dynamic stress fuzzy data

序号	临界动应力 $\tilde{y}/\text{kPa}$	频率 $x_1/$ Hz	围压 $x_2/$ kPa	p_i	q_i
1	(210, 220, 230)		30	220	10
2	(220, 235, 250)	1	50	235	15
3	(250, 260, 270)		70	260	10
4	(190, 205, 220)		30	205	15
5	(220, 230, 240)	2	70	230	10
6	(240, 255, 270)		100	255	15
7	(190, 205, 220)		50	205	15
8	(210, 220, 230)	3	70	220	10
9	(230, 240, 250)		100	240	10
10	(160, 170, 180)		30	170	10
11	(170, 185, 200)	5	50	185	15
12	(220, 230, 240)		100	230	10
13	(270, 285, 300)	1	100	285	15
14	(210, 220, 230)	2	50	220	10
15	(170, 185, 200)	3	30	185	15
16	(190, 200, 210)	5	70	200	10

本研究使用模糊线性回归模型 $\tilde{y}_i = \tilde{\alpha}_0 + \tilde{\alpha}_1 x_1 + \tilde{\alpha}_2 x_2$ 对试验数据进行分析, 所得回归方程为:

$$\tilde{y}_i = (207.664\ 2 + 15.619\ 8E) + (-12.124\ 2 - 0.359\ 6E)x_1 + (0.748\ 1 - 0.035\ 2E)x_2. \quad (10)$$

为了验证回归模型的准确性, 选用前 12 组数据进行拟合, 再利用后 4 组数据对回归结果进行检验, 检验结果如表 4 所示。

表 4 模糊线性回归结果检验
Tab. 4 Test of fuzzy linear regression result

序号	频率 x_1/Hz	围压 x_2/kPa	实测临界动应力 $\tilde{y}/\text{kPa}$	回归临界动应力 $\tilde{y}'/\text{kPa}$
1	1	100	(270, 285, 300)	(257.21, 270.35, 283.50)
2	2	50	(210, 220, 230)	(207.68, 220.82, 233.96)
3	3	30	(170, 185, 200)	(180.59, 193.73, 206.88)
4	5	70	(190, 200, 210)	(186.27, 199.41, 212.55)

可以看出，临界动应力随着频率的增加而减小，随着围压的增大而增大。所建立的模糊回归模型相对误差不超过 5%，可见回归效果较好，能够较好地反映临界动应力与频率及围压之间的关系。

3 结 论

(1) 煤渣改良土的动弹性模量随着加载次数的增加呈负指数关系逐渐降低。所建立的动弹性模量衰减模型中系数 A ， B 分别代表了围压及频率对动弹性模量带来的影响。

(2) 煤渣改良土临界动应力的大小与加载的频率及围压有关。当加载频率一定时，临界动应力随着围压的增加而增加，二者大致呈现出线性关系。当围压一定时，随着加载频率的提高临界动应力出现下降趋势。当频率从 1 Hz 增大到 3 Hz 时临界动应力约下降 16.2%；当频率由 3 Hz 增大到 5 Hz 时，临界动应力约下降 8.4%

(3) 利用结构元方法所构建的模糊线性回归模型可以较好地反映临界动应力与频率及围压的关系。模型精度较高，可以对不同条件下路基土体的临界动应力进行估算。

参考文献：

References:

[1] 王红鑫,周承京,陈群. 煤渣掺量对灰渣混合料力学性质的影响 [J]. 水电能源科学, 2015, 33 (9): 113 - 116.
WANG Hong-xin, ZHOU Cheng-jing, CHEN Qun. Impact of Coal Cinder Content on Mechanical Property of Ash Residue Mixture [J]. Water Resources and Power, 2015, 33 (9): 113 - 116.

[2] KURAMA H, KAYA M. Usage of Coal Combustion Bottom Ash in Concrete Mixture [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22 (9): 1922 - 1928.

[3] 黄娟,丁祖德,袁铁映,等. 循环荷载作用下泥炭质土的动变形特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38

(9): 2551 - 2558.

HUANG Juan, DING Zu-de, YUAN Tie-ying, et al. Experimental Study of Dynamic Deformation Properties of Peaty Soil under Cyclic Loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (9): 2551 - 2558.

[4] 张向东,冯胜洋,潘宇. 二灰改良风积土动力特性试验 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21 (2): 89 - 93.
ZHANG Xiang-dong, FENG Sheng-yang, PAN Yu. Experimental Study on Dynamic Performance for Lime-flyash-improved Aeolian Soil [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21 (2): 89 - 93.

[5] 张向东,曹启坤,潘宇. 二灰改良土动力特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (8): 2560 - 2564.
ZHANG Xiang-dong, CAO Qi-kun, PAN Yu. Experiment Research of Lime-fly Ash Soil's Dynamics Characteristics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (8): 2560 - 2564.

[6] 张泽林,吴树仁,唐辉明,等. 黄土和泥岩的动力学特性及微观损伤效应 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (5): 1256 - 1268.
ZHANG Ze-lin, WU Shu-ren, TANG Hui-ming, et al. Dynamic Characteristics and Microcosmic Damage Effect of Loess and Mudstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (5): 1256 - 1268.

[7] 陈乐求,张家生,陈俊桦,等. 水泥改良泥质板岩粗粒土的静动力特性试验 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (7): 1903 - 1910.
CHEN Le-qiu, ZHANG Jia-sheng, CHEN Jun-hua, et al. Testing of Static and Dynamic Strength Properties of Cement - improved Argillaceous-slate Coarse-grained Soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (7): 1903 - 1910.

[8] 周葆春,白颢,孔令伟. 循环荷载下石灰改良膨胀土临界动应力的探讨 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (增 2): 163 - 168.
ZHOU Bao-chun, BAI Hao, KONG Ling-wei. Testing of Static and Dynamic Strength Properties of Cement-improved Argillaceous-slate Coarse-grained Soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (S2): 163 - 168.

[9] 刘钢. 基于长期累积变形演化状态控制的高速铁路基床结构设计方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
LIU Gang. Study on Design Method for Subgrade of High-speed Railway Based on Long-term Cumulative Deformation Evolution State Controlling [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[10] GUNEY Y, SARI D, CETIN M, et al. Impact of Cyclic

- Wetting-drying on Swelling Behavior of Lime-stabilized Soil [J]. Building and Environment, 2007, 42 (2): 681 - 688.
- [11] WERKMEISTER S, NUMRICH R, DAWSON A R, et al. Design of Granular Pavement Layers Considering Climatic Conditions [J]. Transportation Research Record, 2003, 1837: 61 - 70.
- [12] TRINH V N, TANG A M, CUI Y J, et al. Mechanical Characterisation of the Fouled Ballast in Ancient Railway Track Substructure by Large-scale Triaxial tests [J]. Soils and Foundations, 2012, 52 (3): 511 - 523.
- [13] YASUHARA K, MURAKAMI S, SONG B W, et al. Post Cyclic Degradation of Strength and Stiffness for Low Plasticity Silt [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129 (8): 756 - 769.
- [14] 王静, 吕翔, 张云龙, 等. 季冻区路基土静动模量关系研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (9): 25 - 30.
- WANG Jing, LÜ Xiang, ZHANG Yun-long, et al. Study on Relationship Static and Dynamic Moduli of Subgrade Soil in Seasonal Frozen Area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (9): 25 - 30.
- [15] 闫治利, 龙建辉, 经明, 等. 低震多频高烈度区黄土的动弹性模量和阻尼比特性 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (6): 47 - 52, 126.
- YAN Zhi-li, LONG Jian-hui, JING Ming, et al. Study on Relationship Static and Dynamic Moduli of Subgrade Soil in Seasonal Frozen Area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (6): 47 - 52, 126.
- [16] 张向东, 刘家顺, 张虎伟. 循环荷载作用下软土动力特性试验研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (5): 1 - 7, 20.
- ZHANG Xiang-dong, LIU Jia-shun, ZHANG Hu-wei. Experimental Study on Dynamic Characteristic of Soft Soil under Cyclic Loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (5): 1 - 7, 20.
- [17] 冷伍明, 刘文勍, 周文权. 振动荷载作用下重载铁路路基粗颗粒土填料临界动应力试验研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34 (16): 25 - 30.
- LENG Wu-ming, LIU Wen-jie, ZHOU Wen-quan. Testing Research on Critical Cyclical Stress of Coarse-grained Soil Filling in Heavy Haul Railway Subgrade [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34 (16): 25 - 30.
- [18] 王鑫, 沈扬, 王保光, 等. 列车荷载下考虑频率影响的软黏土破坏标准研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (增1): 32 - 37.
- WANG Xin, SHEN Yang, WANG Bao-guang, et al. Failure Criteria for Soft Clay Subjected to Frequencies under Train Loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (S1): 32 - 37.
- [19] 刘晓红, 杨果林, 方薇. 红黏土临界动应力与高铁无碴轨道路堑基床换填厚度 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (3): 348 - 353.
- LIU Xiao-hong, YANG Guo-lin, FANG Wei. Critical Dynamic Stress of Red Clay and Replacement Thickness of Ballastless Track Cutting Bed of High-speed Railways [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (3): 348 - 353.
- [20] 汪华东, 郭嗣琮, 岳立柱. 基于结构元理论的模糊多元线性回归模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34 (10): 2628 - 2636.
- WANG Hua-dong, GUO Si-cong, YUE Li-zhu. An Approach to Fuzzy Multiple Linear Regression Model Based on the Structured Element Theory [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34 (10): 2628 - 2636.
- [21] 曾繁慧, 刘斌, 魏帅. 结构元方法的模糊线性回归模型 [J]. 数学的实践与认识, 2016, 46 (7): 162 - 167.
- ZENG Fan-hui, LIU Bin, WEI Shuai. A Fuzzy Linear Regression Model Based on the Structure Element [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46 (7): 162 - 167.
- [22] 杨广庆. 水泥改良土的动态特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (7): 1156 - 1160.
- YANG Guang-qing. Study of Dynamic Performance of Cement-improved Soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (7): 1156 - 1160.