

DOI: 10.11779/CJGE201710006

基于加速应力试验方法的气泡混合轻质土使用 寿命估计研究

刘 鑫^{1, 2, 3}, 甘亮琴^{1, 2, 4}, 盛 柯^{1, 2, 4}, 洪宝宁^{1, 2, 4}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心(河海大学), 江苏 南京 210098;
3. 河海大学隧道与地下工程研究所, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于加速应力试验方法, 借助概率统计理论分析了以水泥、水和气泡群为组成材料的气泡混合轻质土疲劳寿命的特点及其分布, 建立了气泡混合轻质土的线性化疲劳方程, 预测了气泡混合轻质土在正常车辆荷载作用下的使用寿命。研究结论表明: 通过不同加速应力下疲劳寿命的平均值、标准差和变异系数3个指标判别, 同一应力下的气泡混合轻质土的疲劳寿命离散性较小, 离散程度随着加速应力的增大而增大; 基于加速应力试验结果线性回归分析, 证明气泡混合轻质土疲劳寿命服从对数正态分布; 建立了气泡混合轻质土的疲劳寿命方程, 表明疲劳寿命的对数是加速应力的递减函数; 估计了正常车辆荷载作用下气泡混合轻质土的平均使用寿命约为73 a。

关键词: 气泡混合轻质土; 加速应力试验; 对数正态分布; 疲劳方程; 使用寿命

中图分类号: TU525 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)10-1793-07

作者简介: 刘 鑫(1984-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土微细结构试验与损伤研究。E-mail: liuxin100@hhu.edu.cn。

Experimental study on service life of foamed mixture lightweight soil based on method of accelerated stress tests

LIU Xin^{1, 2, 3}, GAN Liang-qin^{1, 2, 4}, SHENG Ke^{1, 2, 4}, HONG Bao-ning^{1, 2, 4}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Tunnel and
Underground Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Geotechnical Research Institute, Hohai University,
Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the method of accelerated stress tests, the characteristics and distribution of fatigue life of foamed mixture lightweight soil (FMLS) which consists of cement, water and bubble are analyzed with the help of probability and statistics theory. The linear fatigue equation for FMLS is established based on a series of unbiased estimations. At the same time, the service life of FMLS under normal traffic load is predicted. The research results indicate that the fatigue life of FMLS under identical traffic load is considered to have small discreteness according to the three indices of average value, standard deviation and variable coefficient, but the discrete degree increases with the increase of the accelerated stress. The results of linear regression indicate that the fatigue life of FMLS obeys the lognormal distribution. The fatigue life equation for FMLS is established, and the logarithm of fatigue life of FMLS proves to decrease with the increase of the accelerated stress according to the fatigue equation. Finally, the average service life of FMLS under normal traffic load is predicted to be about 73 years.

Key words: foamed mixture lightweight soil; accelerated stress test; lognormal distribution; fatigue equation; service life

0 引言

气泡混合轻质土是为解决桥头跳车、道路改扩建、地铁空间上覆减荷和地下空洞填充等工程难题而开发的一种新型轻质土工材料, 主要由可选添加材料、固化材料、气泡群和水按一定的比例经过充分的搅拌混合而成, 先后成功应用于中江高速、京珠高速、北京奥林匹克中心地下通道等重大工程中^[1-2]。从气泡混合

轻质土的应用来看, 因长期承受交通荷载、化学侵蚀等的作用, 其耐久性是不容忽略的课题, 国内外学者和工程技术人员对其已开展部分研究。如: Takeshi

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51609071); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20140848); 广东省交通运输厅科技项目(科技-2015-02-013)

收稿日期: 2016-07-21

等^[3]研究了聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)在气泡混合轻质土中的添加应用，并分析了在90℃温度下气泡混合轻质土的结构将产生裂缝。Jongpradist^[4]开展了水泥、黏土混合物中掺入气体的试验，进行了单轴、固结试验、三轴试验，推荐采用有效孔隙比参数表示轻质土在影响因素下力学性能的从属关系。Kikuchi等^[5]将气泡混合轻质土成为超级岩土材料(SGM)，分析了其渗透性和吸附性，土样切片中孔隙逐渐被水取代，取代区域不受渗透系数的影响而受气体体积的影响。Park等^[6]运用人工神经网络基于试验数据建模以预测气泡混合轻质土无侧限抗压强度。Kim等^[7]将气泡混合轻质土在道路加宽中应用，研究了抗压强度、毛细上升高度、路基沉降变化情况。章灿林等^[8]研究了冻融循环和酸碱腐蚀对不同原料土掺量的气泡轻质土性能和微观结构的影响。刘楷等^[9]采用水泥和地聚合物作为固化剂制备气泡混合轻质土，分析了干湿循环级数和硫酸钠浸泡环境对其强度特性的影响规律。从以上研究可以看出，目前国内外对气泡混合轻质土的研究主要集中在物理力学特性、化学侵蚀等方面，而对气泡混合轻质土在车辆荷载作用下的使用寿命还未进行研究。使用寿命是工程设计标准之一，如未能科学合理地预测气泡混合轻质土在循环车辆荷载作用下的寿命，工程将存在较大的安全隐患，因此研究气泡混合轻质土在车辆荷载作用下的使用寿命有较大的意义。

加速应力试验是在保持失效机理不变的条件下用加大应力的试验方法加速试验样品失效，选用相应的加速模型估计试验样品在正常应力下的寿命(或可靠性)特征值。加速应力试验具有试验时间短，试验成本低，试验条件和结果可控等优点，自20世纪70年代引进中国以来，已在建筑工程领域中发展起来，吴瑾等^[10]、方志等^[11]通过加速应力试验研究了混凝土材料的疲劳特性，取得了较理想的成果，但目前尚未有学者利用加速应力试验方法研究气泡混合轻质土的使用寿命。

本文将引用加速应力试验的方法预估气泡混合轻质土在车辆荷载作用下的使用寿命，通过计算出正常荷载来确定加速应力，借助于概率统计理论分析，研究气泡混合轻质土的寿命分布，采用线性加速模型，推导正常荷载下的疲劳寿命方程，预估相应的疲劳寿命。

表1 气泡混合轻质土配合比设计

Table 1 Mix proportion design of lightweight soil mixed with bubble

28 d 抗压强度 /MPa	气泡混合轻质土单方材料组成			试配湿密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥浆单方材料组成		水泥浆湿密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
	水泥 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泡沫/L		水泥 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	
1.0	500	293.4	500	900	1109.2	650.9	1760.1

1 车辆荷载加速应力试验

1.1 试块配合比与制样

试验选用镇江水泥厂生产的#42.5海螺牌普通硅酸盐水泥作为固化材料；发泡剂为高分子复合型水泥发泡剂，常温下为无色液体，PH值7.5~9.0，稀释倍率为1:40。考虑到与工程实际相对应，本文采用工程中常用的配合比，见表1。制样流程依据《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》(CJJ/T 177—2012)^[12]，配制的水泥浆湿密度为1750(± 50) kg/m^3 ，通过1000mL量程的烧杯和2000g量程的电子称称取质量并计算湿密度。无侧限抗压强度采用长春机械厂生产的电子万能试验机(CSS-44050)，加载速率为2kN/s。

按配合比将水泥和水充分搅拌成浆液状态，使得水泥浆中不再含有较大的颗粒，在搅拌水泥浆的同时将调配好的稀释倍率为1:40的发泡液通过高压水泥发泡机发泡。然后将泡沫掺入搅拌好的水泥浆液中，匀速搅拌5min，测量密度。达到设计密度后将气泡混合轻质土装入100mm×100mm×100mm立方体模具中，在表面覆盖薄膜后置于20(±2)℃的恒温条件下养护。养护24h后脱模，再将全部试块在实验室自然搁置至设计龄期。试验时试块分3批成型，每批5组，每组3个，共45个。每组中随机取1个进行无侧限抗压强度试验，抗压强度达到1(±2)MPa则合格。经实际测定15个试块，13个试块的抗压强度在0.8~1MPa之间，2个试块在1~1.2MPa之间。

1.2 试验荷载与加速因子

车辆荷载按双车道荷载计算，即横向分布的车辆数为2，将车辆荷载换算为均布荷载，建立计算公式：

$$q = \gamma h_0 = \frac{NQ}{LB} \quad (1)$$

式中 q 为均布荷载(kPa)； γ 为土的重度(kN/m^3)； h_0 为荷载当量土柱高度(m)； N 为横向分布的车辆数； L 为前后轴距及轮胎着地长度(m)； Q 为单辆车重(kN)； B 为横行分布车辆轮胎外缘之间的距离(m)。进一步分析可知：

$$B = Nb + (N - 1)d \quad (2)$$

式中， b 为每辆车轮胎外缘之间的距离(m)， d 为相邻两车辆之间的净距(m)。

式(1)和式(2)中有关车辆的参数按照《公路工程技术标准》(JTGB01—2014)^[13]的相关要求取值。对于公路-I级, $L=13\text{ m}$, $Q=550\text{ kN}$, 经计算 $B=5.2\text{ m}$ 。将相关数据代入式(1)可得 $q=16.27\text{ kPa}$, 故取车辆荷载应力为 17 kPa 。对于路面结构层, 为了方便计算, 取高度为 1 m , 荷载应力为 25 kPa 。根据现有的《气泡混合轻质土填筑工程技术规程 CJJ/T177—2012》, 轻质土路基最大填土高度为 15 m , 本文所制作的轻质土 28 d 测得的重度为 7.8 kN/m^3 , 因此计算得到轻质土自重引起的最大荷载应力为 117 kPa 。由上述可知, 气泡混合轻质土在正常使用条件下, 受到的荷载应力为 159 kPa , 因此, 本试验中正常应力 SR_0 取 0.159 MPa 。

本文取加速因子为加速应力与正常应力之比, 表征实际荷载应力的放大倍数。根据加速应力的确定原则, 最低加速应力在不过分增加试验时间和费用的条件下尽可能接近正常应力 SR_0 , 而最高加速应力在不改变失效机理的条件下, 为了获得较高的加速效果应尽可能高。参考文献[14]并综合本试验特点, 由于本文的试块极限荷载应力为 $1(\pm 0.2)\text{ MPa}$, 且大部分试块的极限荷载应力在 $0.8\sim 1\text{ MPa}$ 之间, 而加速应力应低于极限荷载应力。因此, 本试验的最大加速应力取为 0.8 MPa , 最小加速应力是在前期试验基础上认为试验持续时间较为合理而采用的。本试验最终选择 3 组加速应力, 分别为 $SR_1=0.6$, 0.7 , 0.8 MPa , $i(=1, 2, 3)$ 为试验组号, 即加速因子分别为 3.77 , 4.40 , 5.03 。

1.3 加速应力试验

试块养护 28 d 后开始疲劳试验。采用 Zwick-100HFP5100 疲劳试验机, 频率范围 $1\sim 150\text{ Hz}$, 静载土 100 kN , 动载土 50 kN 。加载波形为正弦波, 近似于路面所受到的车辆荷载的实际波形, 采用低频抗压疲劳方式, 加载频率为 1 Hz , 加载曲线如图 1 所示。其中: 试验上限荷载应力 σ_{\max}^f 即为最大应力 σ_{\max} ; 试验下限荷载应力 σ_{\min}^f 即为最小应力 σ_{\min} ; 平均荷载应力 σ_m^f 即为平均应力 σ_m , 是最大应力与最小应力的平均值; 应力幅值 σ_a 为 σ_{\max} 或 σ_{\min} 与 σ_m 的差值。试验分 3 组进行, 所对应的最大应力分别为 $SR_1=0.6\text{ MPa}$, $SR_2=0.7\text{ MPa}$, $SR_3=0.8\text{ MPa}$, 为了固定试块的位置, 每级最小应力取为 0.07 MPa 。为了缩短试验时间, 采用定数截尾, 即随机抽取 10 个试块, 当有 9 个试块发生破坏时即可停止。

2 试验结果

2.1 疲劳寿命分布

加速应力试验结果见图 2, 从图 2 可看出同一加速应力的气泡混合轻质土的疲劳寿命分布在一定的区间内, 在该区间内, 任一试块的寿命具有不确定性。计算不同加速应力下的平均值、标准差和变异系数, 列于表 2 中。从表 2 可看出, 3 组试验的变异系数较小, 仅为 0.5% , 0.6% 和 12.4% , 通常一组数据的变异系数越小, 表征该组数据的离散程度越小。因此, 同一加速应力下气泡混合轻质土的疲劳寿命偏离平均值的程度不大, 即离散程度较小, 但随着加速应力的增高, 离散程度不断增大, 反映出加速应力试验的加速应力不能过大, 本文选择的 3 组加速应力较为合理。

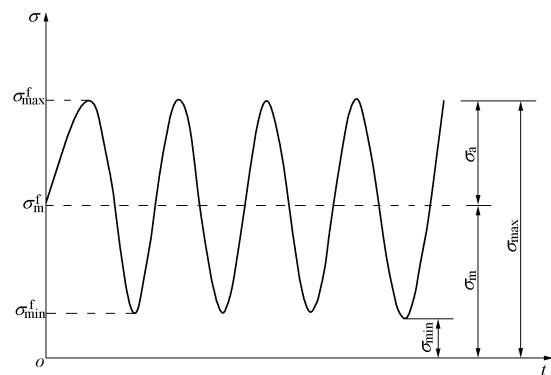


图 1 等幅恒加载曲线

Fig. 1 Curves of continuous constant load

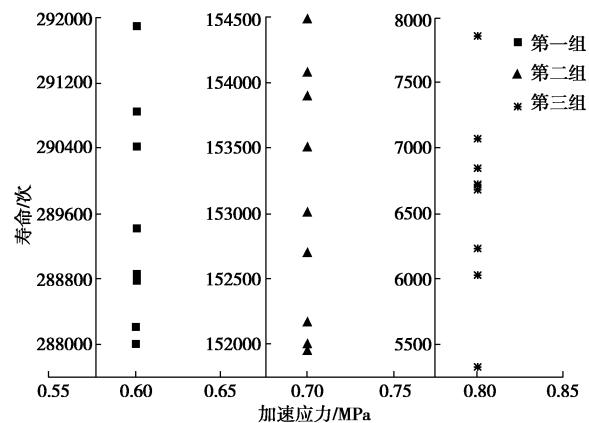


图 2 疲劳试验结果

Fig. 2 Results of fatigue tests

表 2 不同加速应力下的数值特征

Table 2 Numerical characteristics under different accelerated loads

序号	加速应力/MPa	平均值	标准差	变异系数
1	0.6	289316	1471	0.005
2	0.7	153091	950	0.006
3	0.8	6199	769	0.124

2.2 疲劳寿命服从对数正态分布假设

加速应力试验得到的是一定加速应力下的疲劳作用循环次数, 为了建立疲劳方程, 必须对加速应力试

验结果进行统计分析, 合理描述疲劳寿命。正态分布是实际工程中应用最为广泛的一种概率分布形式, 设随机变量 X 为疲劳寿命, x_j 为寿命值, 若 $X \sim (\mu, \sigma^2)$, 根据概率密度函数与正态分布定义, 可得如下方程:

$$\begin{aligned} F(0) &= P(X \leq 0) \\ &= \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_j - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dx_j > 0. \quad (3) \end{aligned}$$

即疲劳寿命 X 取小于零的概率大于零, 而实际工程中疲劳寿命 X 取小于零的概率为零, 因此用正态分布来描述疲劳寿命并不符合实际情况。考虑到疲劳寿命 X 恒大于零, 因此对疲劳寿命作对数变换, 则 $\ln X$ 的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$, 符合正态分布要求。因此可假设 $\ln X$ 服从正态分布, 即疲劳寿命 X 服从对数正态分布, 根据对数正态分布定义, 可得如下方程:

$$F(0) = P(X \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f(x_j) dx_j = 0. \quad (4)$$

由前述分析可知, 疲劳寿命以对数正态分布描述, 符合实际情况。

2.3 疲劳寿命服从对数正态分布检验

将 $\ln X \sim (\mu, \sigma^2)$ 化成标准正态分布。令 $Z = \frac{\ln X - \mu}{\sigma}$, 根据概率密度函数与正态分布定义有

$$\begin{aligned} P(Z \leq \ln x_j) &= P\left(\frac{\ln X - \mu}{\sigma} \leq \ln x_j\right) \\ &= P(\ln X \leq \mu + \sigma \ln x_j) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\mu + \sigma \ln x_j} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dt. \quad (5) \end{aligned}$$

令 $\frac{t - \mu}{\sigma} = u$, 得

$$\begin{aligned} P(Z \leq \ln x_j) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\ln x_j} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \\ &= \varphi(\ln x_j). \quad (6) \end{aligned}$$

其中, $\varphi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 为标准正态函数,

由此得 $\frac{\ln X - \mu}{\sigma} \sim (0, 1)$, 即

$$\begin{aligned} F(\ln x_j) &= P(\ln X \leq \ln x_j) \\ &= P\left(\frac{\ln X - \mu}{\sigma} \leq \frac{\ln x_j - \mu}{\sigma}\right) = \varphi\left(\frac{\ln x_j - \mu}{\sigma}\right). \quad (7) \end{aligned}$$

由于 $\varphi(x)$ 为严格单调增函数, 其反函数必存在。对式 (7) 两边取反函数, 并令 $M = \varphi^{-1}(F(\ln x_j))$, $N = \ln x_j$, $A = \frac{1}{\sigma}$, $B = \frac{\mu}{\sigma}$, 则有 $M = AN - B$ 。该式可用来检验一组试验数据服从正态分布的假设是否成立。即若气泡混合轻质土疲劳寿命的对数服从正态分布, 则 M 与 N 必成线性关系。系数 A 和 B 通过线性回归求得, M 通过计算失效概率求得。失效概率可通过下式计算:

$$F(x_j) = \frac{j}{r+1} \quad (j=1, 2, \dots, r), \quad (8)$$

式中, r 为某一加速应力下得到的试验数据总数, 即截尾数, j 为试验试块序号。

疲劳寿命的对数正态分布检验见图 3~5, 从图 3~5 的线性回归分析可看出, 相关系数 R 都在 0.95 以上, $N = \ln x_j$ 与 $M = \varphi^{-1}(F(\ln x_j))$ 之间呈现出很好的线性关系, 表明气泡混合轻质土的疲劳寿命的对数服从正态分布, 即气泡混合轻质土的疲劳寿命服从对数正态分布的假设成立。

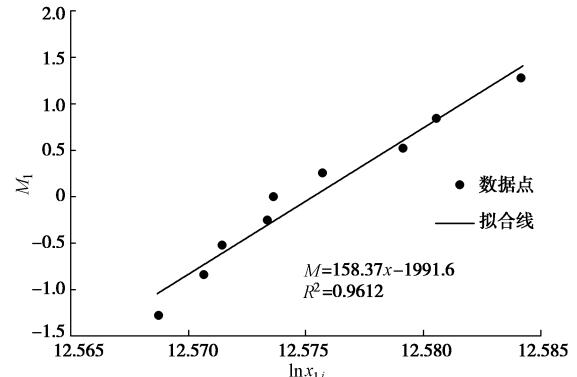


图 3 $SR_1=0.6$ MPa 时疲劳寿命的对数正态分布检验

Fig. 3 Verification of lognormal distribution of fatigue life when
 $SR_1=0.6$ MPa

表 3 疲劳寿命的对数正态分布检验

Table 3 Verification of lognormal distribution of fatigue life

试块编号	$SR_1=0.6$ MPa	$SR_2=0.7$ MPa	$SR_3=0.8$ MPa	$F(x_j)$	$\varphi^{-1}(F(\ln x_j))$	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$
	$\ln x_{1j}$	$\ln x_{2j}$	$\ln x_{3j}$				
1	12.5687	11.9313	8.5200	0.1	-1.281667	0.3423	0.2101
2	12.5707	11.9317	8.5975	0.2	-0.841786	0.0937	0.1085
3	12.5715	11.9327	8.6341	0.3	-0.524412	0.0559	0.1060
4	12.5734	11.9363	8.7101	0.4	-0.253333	0.0215	0.1036
5	12.5736	11.9383	8.7645	0.5	0.000000	-0.0119	0.1011
6	12.5757	11.9415	8.7661	0.6	0.253333	-0.0465	0.0986
7	12.5791	11.9440	8.7855	0.7	0.524412	-0.0851	0.0957
8	12.5805	11.9452	8.8206	0.8	0.841786	-0.1334	0.0921
9	12.5841	11.9479	8.9296	0.9	1.281667	-0.2364	0.0843

注: n 为一组试验的试块总数。

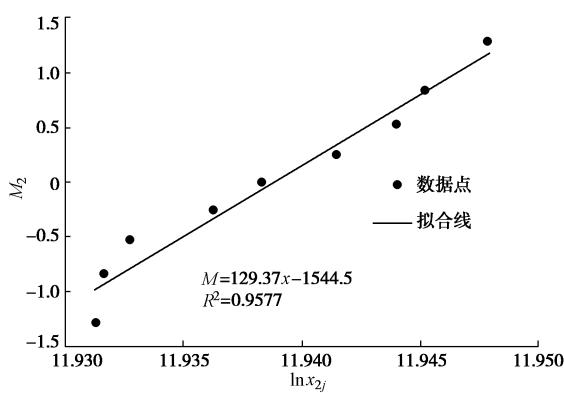
图 4 $SR_2=0.7$ MPa 下疲劳寿命的对数正态分布验证

Fig. 4 Verification of lognormal distribution of fatigue life when
 $SR_2=0.7$ MPa

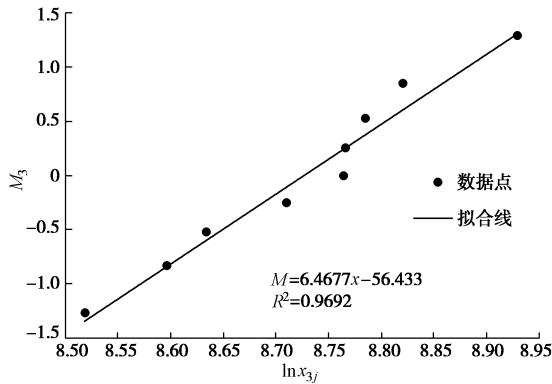
图 5 $SR_3=0.8$ MPa 下疲劳寿命的对数正态分布验证

Fig. 5 Verification of lognormal distribution of fatigue life when
 $SR_3=0.8$ MPa

3 使用寿命估计

3.1 疲劳方程的建立

国内外大量试验表明寿命特征与加速应力之间关系通常是非线性的,为了方便实际使用,在建立疲劳寿命方程时应尽量对寿命数据和加速应力进行适当转换,将其线性化。本文通过前述试验数据建立如下疲劳寿命方程:

$$\ln X = A + B\phi(SR) \quad (9)$$

式中 X 为寿命特征,即一定概率的试块寿命达到 X 以上; A , B 为待估参数; $\phi(SR)$ 为应力 SR 的某一已知函数,本文中 SR 为加速应力, $\phi(SR)=SR$ 。以中位寿命 $X_{0.5}$ (50%的试块寿命达到 $X_{0.5}$ 以上)作为寿命特征,假定 $\ln X_{0.5}=\mu$,则寿命服从对数正态分布的气泡混合轻质土的疲劳寿命方程为

$$\mu = \ln X_{0.5} = A + B\phi(SR) \quad (10)$$

根据可靠性试验用表^[15],各加速应力下 σ_i 和 μ_i 的最好线性无偏估计由式(11)和(12)计算得到,计算值见表 4。

$$\hat{\mu}_i = \sum_{j=1}^r D'(n, r, j) \ln x_{ij} \quad , \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}_i = \sum_{j=1}^r C'(n, r, j) \ln x_{ij} \quad . \quad (12)$$

式中, $C'(n, r, j)$, $D'(n, r, j)$ 分别称为正态分布中参数 σ 和 μ 的最好线性无偏估计系数,可查对数正态分布的最好线性无偏估计系数表,取值见表 3。

表 4 各加速应力下 σ_i 和 μ_i 的无偏估计Table 4 Unbiased estimations of σ_i and μ_i at different accelerated stresses

无偏估计量	$SR_1=0.6$ MPa	$SR_2=0.7$ MPa	$SR_3=0.8$ MPa
$\hat{\mu}_i$	12.5743	11.9376	8.6968
$\hat{\sigma}_i$	0.0048	0.0060	0.1553

采用最小二乘法计算线性模型中未知参数 A 和 B ,令 $Q = \sum_{i=1}^3 (\hat{\mu}_i - A - B\phi_i)^2$, 对 A 和 B 求偏导数,并令其等于零,则有矩阵:

$$\begin{bmatrix} 3 & \sum \phi_i \\ \sum \phi_i & \sum \phi_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \hat{\mu}_i \\ \sum \phi_i \hat{\mu}_i \end{bmatrix}, \quad (13)$$

即 $\begin{cases} 3A + 2.1B = 33.2087 \\ 2.1A + 1.49B = 22.8583 \end{cases}$,解得 $A=24.6426$, $B=-19.39$ 。

因此气泡混合轻质土的疲劳寿命方程为

$$\ln X_{0.5} = 24.6426 - 19.39SR \quad . \quad (14)$$

基于本试验建立的疲劳寿命方程是建立在疲劳寿命服从对数正态分布,且假定 $\ln X_{0.5}=\mu$ 的基础上。该疲劳寿命方程斜率为负值,说明疲劳寿命的对数是加速应力的递减函数。

3.2 正常应力的使用寿命特征估计

根据疲劳寿命方程可以得到正常应力 SR_0 下的对数均值 μ_0 的无偏估计值,即

$$\hat{\mu}_0 = \hat{A} + \hat{B}\phi(SR_0) = 21.5596 \quad . \quad (15)$$

在正常应力 SR_0 下的对数标准差 σ_0 的最小方差无偏估计为

$$\hat{\sigma}_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 L'_{r,n_i}^{-1} \hat{\sigma}_i}{\sum_{i=1}^3 L'_{r,n_i}^{-1}} = 0.0554 \quad , \quad (16)$$

其中 L'_{r,n_i} 为 $\hat{\sigma}_i$ 的方差系数,查可靠性试验用表得 $L'_{r,n_i} = 0.0681$ 。

此时正常应力 SR_0 下气泡混合轻质土寿命 X 的分布 $\ln X \sim (\hat{\mu}_0, \hat{\sigma}_0)$ 已确定,因此可以估计出在 SR_0 下气泡混合轻质土的中位寿命:

$$\hat{X}_{0.5} = e^{\hat{\mu}_0} = 2.3079 \times 10^9 \text{ (次)} \approx 73.18 \text{ (a)}$$

平均寿命为

$$E(X) = e^{\mu_0 + 0.5\sigma_0^2}$$

$$= 2.3088 \times 10^9 \text{ (次)} \approx 73.21 \text{ (a)}.$$

将试验值和估计值一同绘在同一坐标下，便得到扩展后的使用寿命与应力曲线，见图 6。

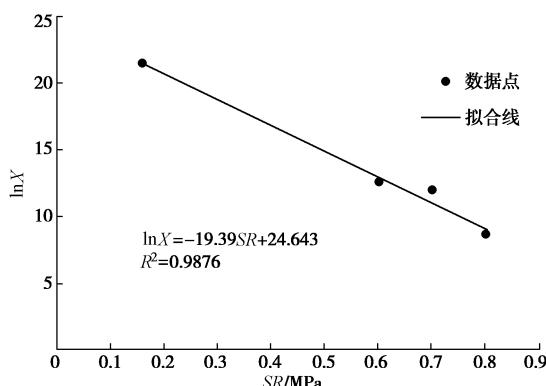


图 6 $\ln X$ 和 SR 扩展线

Fig. 6 Expanded lines of $\ln X$ and SR

至此，本文根据加速应力试验估算了气泡混合轻质土在车辆荷载作用下的使用寿命约 73 a，不可否认，该使用寿命仅考虑车辆荷载最不利作用下的平均寿命，真实寿命应位于涵盖 73 a 的一个区间内，同时，气泡混合轻质土使用寿命受控因素较多，除车辆荷载外，还有降雨入渗、化学侵蚀等因素，其真实使用寿命仍有待进一步研究。

4 结 论

(1) 通过不同加速应力下疲劳寿命的平均值、标准差和变异系数 3 个指标判别，同一应力下的气泡混合轻质土的疲劳寿命离散性较小，离散程度随着加速应力的增大而增大。

(2) 基于加速应力试验结果线性回归分析，证明了气泡混合轻质土疲劳寿命服从对数正态分布。

(3) 建立了气泡混合轻质土的疲劳寿命方程，表明疲劳寿命的对数是加速应力的递减函数。

(4) 估计了正常车辆荷载作用下气泡混合轻质土的平均使用寿命约为 73 a。

参 考 文 献：

- [1] 何国杰, 丁振洲, 郑颖人. 气泡混合轻质土的研制及其性能[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 18–22. (HE Guo-jie, DING Zhen-zhou, ZHENG Ying-ren. Preparation of bubble mixed light soil and its properties[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 18–22. (in Chinese))
- [2] 陈永辉, 石刚传, 曹德洪, 等. 气泡混合轻质土置换路基控制工后沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1854–1862. (CHEN Yong-hui, SHI Gang-chuan, CAO De-hong, et al. Control of post-construction settlement by replacing subgrade with foamed cement banking[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1854–1862. (in Chinese))
- [3] KAMEI T, TAKASHIMA J I, SHIBI T. Temperature effects on unconfined compressive strength and microstructure of foamed mixture lightweight soil containing flaked polyethylene terephthalate (PET) [J]. Soils and Foundations, 2008, 48(6): 833–842.
- [4] JONGPRADIST P. Effective void ratio for assessing the mechanical properties of cement-clay admixtures at high water content[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2011, 137: 621–627.
- [5] KIKUCHI Y, NAGATOME T, MIZUTANI T A. The effect of air foam inclusion on the permeability and absorption properties of light weight soil[J]. Soils and Foundations, 2011, 51(1): 151–165.
- [6] PARK H I, KIM Y T. Prediction of strength of reinforced lightweight soil using an artificial neural network[J]. Engineering Computations, 2011, 28(5): 600–615.
- [7] KIM T H, KIM T H, KANG G C. Performance evaluation of road embankment constructed using lightweight soils on an unimproved soft soil layer[J]. Engineering Geology, 2013, 160(13): 34–43.
- [8] 章灿林, 黄俭才, 熊永松, 等. 不同原料土掺量的气泡轻质土耐久性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(8): 32–36. (ZHANG Can-lin, HUANG Jian-cai, XIONG Yong-song, et al. Durability of foamed cement banking with raw soil[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(8): 32–36. (in Chinese))
- [9] 刘楷, 李仁民, 杜延军, 等. 气泡混合轻质土干湿循环和硫酸钠耐久性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 362–366. (LIU Kai, LI Ren-min, DU Yan-jun, et al. A durability experimental study of lightweight soil subjected to wetting-drying cycles and sodium sulfate soaking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 362–366. (in Chinese))
- [10] 吴瑾, 王晨霞, 徐贾, 等. 疲劳荷载下锈蚀钢筋混凝土梁弯曲性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 118–124. (WU Jin, WANG Chen-xia, XU Jia, et al. Study on flexural behavior of corroded reinforced concrete beams under fatigue loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 118–124. (in Chinese))
- [11] 方志, 向宇, 匡镇, 等. 钢纤维含量对活性粉末混

- 凝土抗疲劳性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 6 - 12. (FANG Zhi, XIANG Yu, KUANG Zhen, et al. Fatigue properties of reactive powder concrete with different steel fiber ratios[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(6): 6 - 12. (in Chinese))
- [12] CJJ/T 177—2012 气泡混合轻质土填筑工程技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (CJJ/T 177—2012 Technical specification for foamed mixture lightweight soil filling engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [13] JTGB01—2014 公路工程技术标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014. (JTGB01—2014 Technical standard of highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese))
- [14] 刘 凯, 罗仁安, 郑 萍, 等. 混凝土高频疲劳加速寿命试验[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2009, 15(2): 205 - 210. (LIU Kai, LUO Ren-an, ZHENG Ping, et al. High frequency fatigue accelerated life test of concrete[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2009, 15(2): 205 - 210. (in Chinese))
- [15] 中国电子技术标准化研究所. 可靠性试验用表[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987. (China Electronics Standardization Institute. Table for reliability test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987. (in Chinese))

第十届全国土动力学学术会议

(一号通知)

主办单位: 中国振动工程学会土动力学专业委员会; 中国地震学会岩土工程防震减灾委员会。

支持单位: 中国土木工程学会土力学与岩土工程分会; 中国水利学会岩土力学专业委员会; 中国力学学会岩土力学专业委员会; 中国地震学会地震工程委员会; 中国地震学会基础设施防震减灾委员会; 中国建筑学会地基基础分会; 江苏省地震学会。

承办单位: 南京工业大学。

协办单位: 《岩土工程学报》; 《防灾减灾工程学报》; 《地震工程与工程振动》; 《地震工程学报》。

第十届全国土动力学学术会议将于2018年11月2日—4日在南京召开。本次会议是继1980年12月6日—12日在安徽合肥召开的“土的动力特性学术讨论会”后从事土动力学与岩土地震工程的科技人员和工程人员的又一次盛会, 在汶川特大地震10周年之际的2018年召开“第十届全国土动力学学术会议”, 将是一次具有历史意义的学术盛会。

会议主题与内容: 围绕“一带一路”战略、“建设海洋强国”战略和“西部大开发”战略中的重大工程灾害灾前预防与综合防范, 本次会议重点研讨防灾减灾救灾工作实施“两个坚持、三个转变”新理念中遇到的土动力学与岩土地震工程领域的前沿科学与关键技术。

具体征文专题如下: ①土的动力特性与本构关系; ②土与结构动力相互作用; ③土动力学数值与物理模拟研究; ④土动力学室内试验方法与新技术; ⑤原位动力测试与表征技术; ⑥砂土液化评价与防治; ⑦强地震动与场地非线性效应; ⑧环境振动与测试技术; ⑨近海工程的特殊土动力学问题; ⑩重大工程的土动力学与岩土地震工程问题; ⑪工程场地地震损失评估与灾害保险。

大会秘书处联系人: 庄海洋 13584050564, 吴志坚 13919182444, 陈炜昀 13770620150、赵凯 13951863149, 王盛年 15077865785。通讯地址: 南京工业大学虹桥校区实验楼400-1室(鼓楼区中山北路200号, 210009)。论文提交邮箱: 王盛年 myresort@126.com, 赵凯 zhaokai@njtech.edu.cn。重要时间: 论文全文截止2018年4月30日, 修改稿截止2018年5月30日, 论文录用通知2018年6月30日。

会议论文征集: 会议论文应为未经正式发表的最新成果, 学术委员会将组织专家对提交论文进行审查, 推荐优秀论文在《岩土工程学报》专刊发表, 其余论文将在《防灾减灾工程学报》、《地震工程与工程振动》和《地震工程学报》增刊发表。

(大会组委会 供稿)