

文章编号:1005-0930(2023)03-0675-015 中图分类号:U414 文献标识码:A  
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2023.03.012

# 铝土尾矿泡沫轻质土单轴抗压力学特性及唯象本构模型

彭远胜<sup>1,2,3</sup>, 欧孝夺<sup>2</sup>, 姬凤玲<sup>1,3</sup>

(1.深圳大学土木与交通工程学院,广东深圳518060;2.广西大学土木建筑工程学院,广西南宁530004;3.深圳大学未来地下城市研究院,广东深圳518060)

**摘要:**铝土尾矿泥是一种常见的工业废弃物,为了更好地利用铝土尾矿泥,减少其对环境的污染,将铝土尾矿泥掺入泡沫轻质土中制备新型铝土尾矿泡沫轻质土,研究了铝土尾矿泥掺量对铝土尾矿泡沫轻质土抗压强度及破坏模式的影响,并基于两参数 Weibull 分布函数,提出适用于铝土尾矿泡沫轻质土材料的一维受压损伤本构模型.研究表明,铝土尾矿泡沫轻质土的无侧限抗压强度随着铝土尾矿泥掺量的增加呈指数型减小,7d 无侧限抗压强度可达到 28d 无侧限抗压强度的 83%;铝土尾矿泡沫轻质土的名义应力-应变曲线在单轴受压作用下主要包括弹塑性阶段和破坏平台阶段,在单轴受压破坏之后存在应变软化和应变硬化行为,具备良好的缓冲性能;根据 Weibull 分布函数和 Avalle 模型,研究了铝土尾矿泡沫轻质土材料一维受压损伤唯象本构模型,建立了模型参数与铝土尾矿泥掺量的关系式,为铝土尾矿泥在泡沫轻质土中的应用提供参考.

**关键词:**铝土尾矿泥;泡沫轻质土;抗压强度;力学特性;唯象本构模型

泡沫轻质土(Foamed mixture lightweight soil, FMLS)具有轻质性、密度和强度可调节性,以及良好的施工性、隔热隔音性、耐久性和环保性等特点<sup>[1]</sup>,在土木工程领域中应用具有巨大的优势.从日本学者在 20 世纪 80 年代初提出泡沫轻质土材料,到国外学者后续对其开展的系列试验,表明泡沫轻质土的密度和强度可通过改变泡沫掺量进行调整,以满足于土木工程领域建筑材料的需求<sup>[2]</sup>.自此以后,泡沫轻质土成为研究的热点之一,通过试验和理论分析,在泡沫轻质土的湿密度、无侧限抗压强度、应力-应变特性、孔隙结构和耐久性等特性方面取得了诸多进展<sup>[3-4]</sup>,泡沫轻质土已被成功应用于保温隔热、地下管道、空腔填充、基坑和路基回填及隧道隔震材料和盾构接收井等领域<sup>[5-9]</sup>.

为了进一步提高泡沫轻质土的性能,科研工作者及工程研究人员通过掺入不同的掺和料或外加剂来开展泡沫轻质土的改性试验研究,已有研究表明,将粉煤灰、硅灰和纤维

收稿日期:2021-08-20;修订日期:2022-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52208353,51938008)

作者简介:彭远胜(1995—),男,博士后.E-mail:ysh\_1007@szu.edu.cn

通信作者:欧孝夺(1970—),教授,博士生导师.E-mail:ouxiaoduo@163.com

添加到泡沫轻质土中可以极大地改善泡沫轻质土的物理力学性能<sup>[10-11]</sup>,但硅灰、纤维等掺料价格较高,探索更经济、来源更广的原材料用以改良泡沫轻质土具有重要意义.Makul和 Sua-iam<sup>[12]</sup>通过立方体抗压强度试验,研究了掺入甘蔗滤饼的泡沫轻质土抗压性能,研究表明,掺入5%甘蔗滤饼的28d抗压强度为对照试样的91.3%.Zhang等<sup>[13]</sup>研究了掺入碱激发粉煤灰和矿渣泡沫轻质土的物理力学和微观特性,发现用20%的矿渣替代粉煤灰,泡沫轻质土的抗压强度提高了68%,而进一步的矿渣替代会导致强度的轻微损失.Khan等<sup>[14]</sup>用再生玻璃粉制备了FMLS,结果表明用20%再生玻璃粉代替水泥时,FMLS的平均抗压强度可达到4.51MPa.苏建等<sup>[15]</sup>、彭远胜等<sup>[16]</sup>分析了铝土尾矿泥(Bauxite tailings, BTs)的化学成分、矿物成分及物理性质,发现铝土尾矿泥是无毒无害的,具有良好的黏性和可塑性.彭远胜等<sup>[16]</sup>通过正交试验,表明用BTs制备的泡沫轻质土具有较好的轻质性、较高的强度及广泛的应用性.

铝土尾矿泥大规模利用可缓解我国土地资源匮乏的迫切需求,铝土尾矿泡沫轻质土应用在岩土工程领域时,除了分析其物理性能、耐久性能外,关键还是要对其力学性能、缓冲性能开展研究.铝土尾矿泡沫轻质土作为一种新型材料,目前的科学研究及理论分析仍十分缺乏.对铝土尾矿泡沫轻质土进行了准静态条件下立方体抗压强度试验,深入研究了铝土尾矿泡沫轻质土在不同铝土尾矿泥掺量下抗压强度的变化规律,以及材料的屈服破坏过程和相应的损伤失效机制.并通过立方体抗压强度试验得到的单轴受压应力-应变曲线,将两参数Weibull分布函数与多孔材料的本构模型相结合,研究了适用于铝土尾矿泡沫轻质土材料的一维受压损伤唯象本构模型,并建立了模型参数与铝土尾矿泥掺量之间的关系式.

## 1 试验材料及试验方法

### 1.1 原材料

试验采用的铝土尾矿泥取自中铝广西分公司1号铝土排泥库,选取洼地中心铝土尾矿泥作为试验土样,其颗粒曲线如图1所示.由图1可以看出,土粒直径小于1mm的铝土

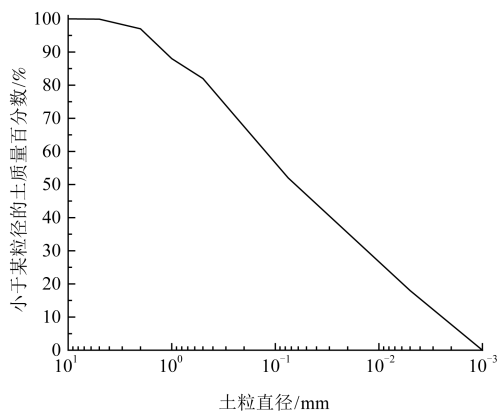


图1 铝土尾矿泥颗粒分曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of BTs

尾矿泥土粒质量占比为88%,小于0.25mm的土粒质量占比高达71%,按照《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)<sup>[17]</sup>,试验用的铝土尾矿泥划分为黏土.试验用的铝土尾矿泥具有细颗粒含量多、比表面积大的特点,故其结合水含量较高.试验用的铝土尾矿泥物理性质如表1所示,铝土尾矿泥经过晒干粉碎后含水量为2%,土粒比重为2.76.

表1 铝土尾矿泥物理性质

Table 1 Physical properties of BTs

密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	含水量 $w/\%$	孔隙比 $e$	比重 $G_s$
1.68	2	0.96	2.76

为了更好地分析铝土尾矿泡沫轻质土化学反应机理,采用 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD)、Rietveld 全谱拟合分析法及 X 射线荧光光谱仪 (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF 光谱仪) 对铝土尾矿泥的化学成分及矿物组成进行定性和定量分析,结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 铝土尾矿泥化学成分

Table 2 Chemical composition of BTs

氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )	氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )	氧化钾( $\text{K}_2\text{O}$ )	氧化钙( $\text{CaO}$ )
38.10%	28.32%	14.93%	1.70%	0.78%	0.32%

表 3 铝土尾矿泥矿物成分

Table 3 Mineral composition of BTs

高岭石 ( $\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$ )	一水硬铝石 ( $\text{HAlO}_2$ )	纤铁矿 ( $\text{HFeO}_2$ )	三水铝石 ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ )	石英 ( $\text{SiO}_2$ )	锐钛矿 ( $\text{TiO}_2$ )	沸石 ( $\text{Al}_{0.8}\text{Si}_{10.2}\text{O}_{21.6}$ )
37.90%	20.34%	20.30%	10.70%	8.00%	1.67%	0.52%

由表 2 可看出,铝土尾矿泥化学成分主要为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 三者的总含量高达 81.35%。由表 3 可看出,铝土尾矿泥中矿物含量最多的是高岭石,含量达到 37.9%。从铝土尾矿泥的化学成分和矿物组成可以看出,铝土尾矿泥含有大量的硅铝组分,易发生火山灰反应,对提升材料的早期强度具有良好的促进作用。

试验用水泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥,其比表面积为  $341\text{m}^2/\text{kg}$ ,比重为  $3\ 100\text{g}/\text{cm}^3$ ,化学成分如表 4 所示。由表 4 可知,水泥的主要化学成分为  $\text{CaO}$ ,占比为 64.52%,其次是  $\text{SiO}_2$ ,占比为 20.2%。

表 4 水泥化学成分

Table 4 Chemical composition of cement

氧化钙( $\text{CaO}$ )	二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )	氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )	三氧化硫( $\text{SO}_3$ )
64.52%	20.20%	4.85%	3.62%	2.85%	0.31%

试验主要采用复合聚合物发泡剂 (Composite polymer foaming agent, CPFA) 来生产铝土尾矿泡沫轻质土,CPFA 是一种碱性无色液体,具备高发泡率、高强度和持久性等优势。

## 1.2 混合比

铝土尾矿泡沫轻质土的配合比设计如表 5 所示。为了研究不同铝土尾矿泥掺量对泡沫轻质土力学性能的影响,试验共设计了 5 种配合比,总胶凝材料固定为  $300\text{kg}/\text{m}^3$ ,铝土

表 5 铝土尾矿泡沫轻质土各组分比例

Table 5 Constituent proportions of FMLS with BTs

编号	总胶凝材料/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	水泥/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	掺量/%	铝土尾矿泥/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	泡沫/ $(\text{L}/\text{m}^3)$
B0	300	300	0	0	710
B10	300	270	10	30	710
B20	300	240	20	60	710
B30	300	210	30	90	710
B40	300	180	40	120	710

注: B10 表示铝土尾矿泥替代总胶凝材料的比例为 10%,其他类同。

尾矿泥掺量为替代总胶凝材料的 0、10%、20%、30% 和 40%，水胶比为 0.6，泡沫掺量约为 710L/m<sup>3</sup>。

### 1.3 试件成型与养护

铝土尾矿泡沫轻质土按照以下步骤<sup>[1]</sup>制备：

- (1) 按照配比(表 5)称取水泥、铝土尾矿泥、水,将其搅拌均匀获得水泥浆液;
- (2) 将发泡剂与水按 1:40 的比例稀释,利用发泡机制得泡沫;
- (3) 按照配比设计表分别将制备的水泥浆液和泡沫输送到搅拌机内,搅拌 5min 使其均匀混合制得混合液,将混合液浇到模具(规格为 100mm×100mm×100mm)中成型;
- (4) 采用塑料薄膜将浇筑到模具的试样覆盖养护 24h,室内温度控制在 20℃;
- (5) 覆盖养护 24h 后拆模,采用塑料薄膜对脱模后的试件进行密封,并将其储存到环境模拟发生器(相对湿度:95±3%,温度:22±2℃)中养护,直到被使用。

### 1.4 试验装置及加载方案

参考《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》CJJ/T 177—2012<sup>[18]</sup>,各龄期下泡沫轻质土的抗压强度采用立方体试件开展试验,试验装置采用微机控制电液伺服万能试验机(型号:WAW-600),并记录试件的应力-应变曲线.加载前将试件上下两端打磨平整,以保证加载过程中试件竖向受力均匀,提高试验的准确度.试件在 0.5kN/s 的速率下进行加载,加载过程中,保证试件放置于试验机的承压板中心,记录相应载荷下荷载-位移曲线,均匀加载直至试件破坏,并对试件破坏形态进行描述.每组试验重复 3 次,并分别取 3 块试件抗压强度的算术平均值作为铝土尾矿泡沫轻质土的抗压强度。

## 2 试验结果分析

### 2.1 铝土尾矿泡沫轻质土抗压强度变化规律

利用铝土尾矿泥制备的泡沫轻质土试样 7d 和 28d 无侧限抗压强度测试结果如图 2 所示。

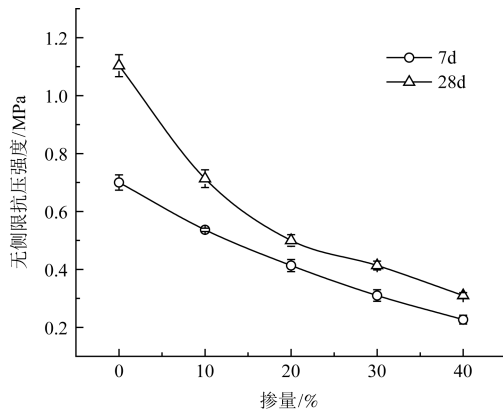


图 2 铝土尾矿泥掺量对泡沫轻质土无侧限抗压强度的影响

Fig.2 Influence of the BTs content on unconfined compressive strength of FMLS

由图 2 可以看出,在铝土尾矿泥掺量为 0 时,泡沫轻质土在 7d 和 28d 的无侧限抗压强度分别为 0.7MPa 和 1.1MPa,7d 无侧限抗压强度为 28d 无侧限抗压强度的 63.6%。随着铝土尾矿泥掺量的增加,铝土尾矿泡沫轻质土的无侧限抗压强度减小,7d 和 28d 平均无侧限抗压强度为 0.37MPa 和 0.48MPa。7d 无侧限抗压强度随铝土尾矿泥掺量的增加呈线性减小趋势,铝土尾矿泥掺量为 10%、20%、30%、40% 时,其无侧限抗压强度值分别是掺量为 0 时的 76.67%、59.05%、44.29%、32.38%;28d 无侧限抗压强度与铝土尾矿泥掺量之间存在非线性关系,铝土尾矿泥掺量为 10%、20%、

30%、40%时,其无侧限抗压强度值分别是掺量为0时的64.65%、45.32%、37.46%、28.1%.

综上所述,铝土尾矿泥取代水泥对泡沫轻质土的无侧限抗压强度有负面影响,由于使用铝土尾矿泥的比例增加,因此Ca/Si比例降低,从而使氢氧化钙不足以进行更充分的水化反应<sup>[19]</sup>,形成的Ca<sup>2+</sup>在大量的土粒中不足以生成充足的凝胶状水化物<sup>[20]</sup>,从而降低了泡沫轻质土的无侧限抗压强度.此外,铝土尾矿泡沫轻质土7d无侧限抗压强度为28d无侧限抗压强度的73%~83%,在掺量为0时,泡沫轻质土7d无侧限抗压强度仅为28d无侧限抗压强度的63.6%.由于铝土尾矿泥比表面积较大,故铝土尾矿泡沫轻质土在水泥发生水化反应之后,铝土尾矿泥的火山灰反应也快速进行,两者共同对铝土尾矿泡沫轻质土早期强度产生积极作用,所以铝土尾矿泡沫轻质土的早期强度较高.铝土尾矿泥对泡沫轻质土早期强度的提升可以在一定程度上满足工程对泡沫轻质土早期强度的需求.

为了获取铝土尾矿泥掺量与泡沫轻质土28d无侧限抗压强度的关系,将测试结果数据进行拟合,拟合结果如图3所示.

由图3可知,铝土尾矿泡沫轻质土的无侧限抗压强度与铝土尾矿泥掺量之间存在指数关系,建立的关系式由式(1)表示.从式(1)中可以看出, $R^2$ 接近于1,说明拟合结果与实验结果具有很好的相关性.由图3还可以看出,随着铝土尾矿泥掺量的增加,铝土尾矿泡沫轻质土的无侧限抗压强度先迅速减小,随后减小幅度逐渐降低.表明随着铝土尾矿泥掺量达到较大值,虽然强度较低,但在满足强度要求时,可加大铝土尾矿泥的掺量,实现铝土尾矿泥的最大化利用,此时强度的变化不大.

$$q_{u,28d}^b = 0.86 \exp\left(\frac{-t_b}{16.88}\right) + 0.24, R^2 = 0.99 \quad (1)$$

式中: $q_{u,28d}^b$ 表示铝土尾矿泡沫轻质土28d的无侧限抗压强度; $t_b$ 表示铝土尾矿泥掺量.

## 2.2 铝土尾矿泥泡沫轻质土破坏机理分析

为了分析铝土尾矿泥泡沫轻质土单轴受压破坏机理,绘制了铝土尾矿泡沫轻质土试件的单轴受压名义应力-应变曲线,如图4所示.泡沫轻质土单轴受压变形典型失效形态如图5所示.

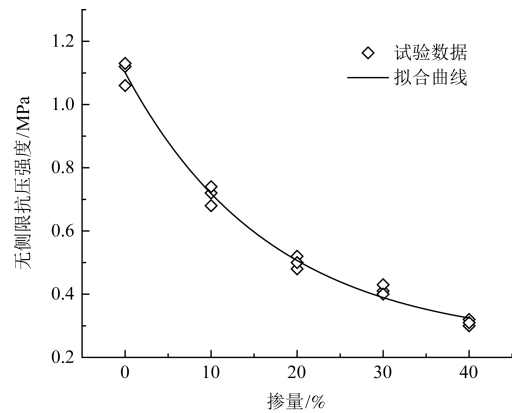


图3 泡沫轻质土无侧限抗压强度与铝土尾矿泥掺量的关系

Fig.3 Relationship between unconfined compressive strength of FMLS and BTs content

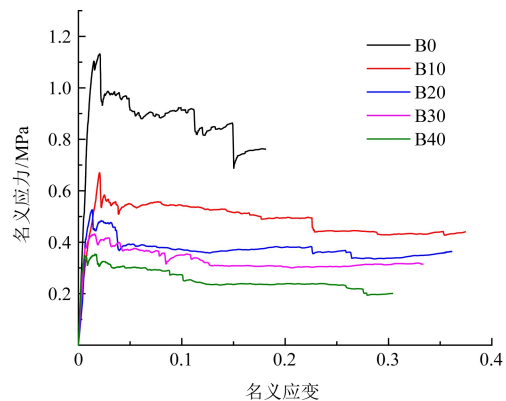


图4 泡沫轻质土单轴受压名义应力-应变曲线随铝土尾矿泥掺量的变化

Fig.4 Change of nominal compressive stress-strain curves of FMLS with BTs content

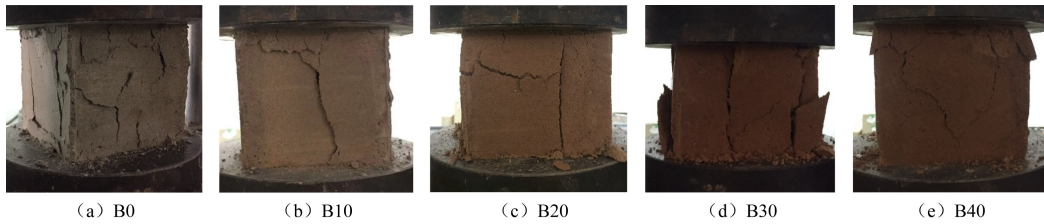


图5 泡沫轻质土的典型失效形态

Fig.5 Typical failure modes of FMLS

由图4可知,铝土尾矿泡沫轻质土单轴受压主要分为弹塑性阶段和破坏平台阶段,且在平台阶段曲线出现了锯齿形波动,掺入铝土尾矿泥的泡沫轻质土的应力-应变曲线相对平滑.在加载的初始阶段,随着名义应变的增加,铝土尾矿泡沫轻质土的名义应力线性增大,此时为弹性阶段,在弹性阶段泡沫轻质土主要通过内部胞壁的弹性变形来抵抗荷载.随着荷载的进一步变大,名义应变与名义应力也进一步增大,超过了胞壁承受荷载的能力,胞壁随即发生脆性破坏,材料出现微裂纹.随后由于荷载的进一步变大,材料的微裂纹数量不断增多,微裂纹逐渐延伸、扩展形成宏观裂纹(图5).微裂纹的扩展意味着泡沫轻质土出现了不可逆的损伤变形,但从曲线可以看到,材料此后依然具备承受荷载的能力,应力峰值点到达之前,名义应力非线性增大,此阶段为塑性阶段.材料的名义应力到达峰值点后马上发生跌落,这则是由于材料微裂纹扩展和宏观裂纹贯穿、失稳导致的,材料从损伤局部化到出现局部失稳,最终导致材料承载力下降.重要的是,泡沫轻质土材料在到达峰值强度后仍然具备承载能力,强度甚至出现回升现象.这表明泡沫轻质土材料在单轴受压荷载作用下具有很明显的延性特征.

在破坏平台阶段,铝土尾矿泡沫轻质土出现名义应力随应变变化而波动的现象(即锯齿形波动现象),表明泡沫轻质土材料存在应变软化和应变硬化相互竞争的特点.而造成材料应变软化行为主要有两个方面的原因,一方面是由于材料胞壁失效和微观裂纹的失稳扩展,而胞壁失效主要由弹性屈曲、塑性破损或者脆性断裂中的其中一个控制<sup>[21-22]</sup>,此时属于破坏阶段,因此明显是由于胞壁发生了脆性断裂导致的.胞壁脆性断裂和微观裂纹的失稳扩展不仅削弱了材料的承载能力,还会引起新的微裂纹扩展,当微裂纹扩展形成新的宏观裂纹时,名义应力下降,这就出现了应变软化现象.另一方面是由于宏观裂纹经历了延伸、扩展,甚至相互连通过程之后,由于单轴抗压试验没有侧向约束,因此试件外围会出现脱落现象(图5(d)),导致横截面面积变小,最终引起名义应力下降.而应变硬化的出现则是由于材料局部化密实引起的,当材料变形继续增大时,材料局部化损伤区域容易出现滑动,此时胞壁及其胞孔在挤碾压溃时可以提供一定的摩阻力,阻止这些区域的进一步滑动,从而在材料内部出现局部密实化区域,使得材料的承载能力得到一定的提升,这就是应变硬化现象.因此,由于泡沫轻质土内部结构孔隙较多,其在破坏阶段存在应变软化和应变硬化相互竞争的现象,当应变软化行为占主导时,泡沫轻质土材料的应力值降低,而当应变硬化行为占主导时,泡沫轻质土材料的应力值提升.这也是泡沫轻质土多孔材料与其他材料的重要区别.

通过以上分析可知,泡沫轻质土材料在单轴受压过程中呈现出不同的变形机制.其中处于弹塑性阶段时,材料主要表现为胞壁弯曲等弹性变形,以及微裂纹的萌生,即出现不可逆的损伤变形;而在破坏平台阶段,主要表现为微裂纹失稳扩展和胞壁脆性断裂,以及胞孔局部化密实.从图4和图5还可以看出,随着铝土尾矿泥掺量的增加,泡沫轻质土胞壁的抗弯和抗压能力以及胞孔的抗坍塌能力均有所降低,导致其抗压强度下降.

从图5可以看出,当铝土尾矿泥掺量较低时,试件外表面的裂纹几乎全部为平行于加载方向的竖向裂纹,仅出现少许垂直于加载方向的横向裂纹;当铝土尾矿泥掺量较高时,试件外表面的裂纹主要为V型裂纹或斜裂纹.表明随着铝土尾矿泥掺量的增加,试件外表面的裂纹以竖向裂纹和横向裂纹为主转为以斜裂纹为主.而铝土尾矿泥掺量较大的泡沫轻质土在受压过程中,试件顶部部分会由于摩擦约束产生横向裂纹,并伴随着局部化损伤区域的压溃,从而形成垂直于受荷方向的压溃面(图5(e)).

此外,通过统计单轴受压破坏试件,得到了铝土尾矿泡沫轻质土材料的单轴受压典型失效形态,如图6所示.从图6可以看出,铝土尾矿泡沫轻质土材料内部的主失效面与压应力方向的夹角基本呈 $45^\circ$ ,其内部失效形态呈正倒相连的“锥型”模式.表明在单轴受压载荷作用下,泡沫轻质土材料的宏观失效主要由受剪损伤机制控制,这与碱渣-矿渣固化土类似<sup>[23]</sup>.

### 2.3 一维受压损伤本构模型

铝土尾矿泡沫轻质土是一种多孔复合材料,由2.2节可知,其在单轴受压破坏平台阶段存在应变软化和应变硬化行为,破坏后还具备一定的承载力.基于以上特点,将铝土尾矿泡沫轻质土应用到实际工程中,具有良好的缓冲性能.而材料力学性能的优化设计往往依赖于应力-应变关系,故有必要研究一种能很好预测材料应力-应变关系的本构模型.目前,针对类似泡沫轻质土的多孔材料,国内外学者对其应力-应变全曲线开展了较多研究,认为其主要经历了弹塑性阶段、平台阶段和密实化阶段<sup>[24]</sup>,一般通过唯象本构模型来描述材料的应力-应变关系,但由于铝土尾矿泡沫轻质土力学性能与基体材料成分、材料密度、工艺过程、加载速率等多种因素有关,故在构建唯象本构关系时会出现多样性及适用范围的局限性.此外,目前尚无铝土尾矿泡沫轻质土本构模型的相关研究,已有的模型没有考虑铝土尾矿泥掺量的影响.本节主要对不同铝土尾矿泥掺量下的立方体抗压试验数据进行分析,构建该材料的一维受压损伤唯象本构模型,为铝土尾矿泡沫轻质土的设计制备和工程应用提供科学参考.

根据Lemaitre应变等效假定,并假设 $\sigma_D$ 为材料损伤后的名义应力, $\varepsilon$ 为材料的名义应变,此时引入一个损伤变量 $D$ ,其值处于0和1之间,无损伤时 $D=0$ ,完全损伤 $D=1$ .据此,Guo等<sup>[25]</sup>建立了一维损伤唯象本构模型,如式(2)所示



图6 单轴受压下试样内部典型失效形态

Fig.6 Typical internal failure modes of sample under uniaxial compression

$$\sigma_D(\varepsilon) = (1 - D)\bar{\sigma}(\varepsilon) \quad (2)$$

其中:  $\bar{\sigma}$  为材料的有效应力.

铝土尾矿泡沫轻质土材料因受压出现的微裂纹及其延伸、扩展过程是难以测量的,损伤破坏是一个与时间相关的流变过程,也是不同形式微裂缝随有限速率演化的时间过程.损伤演化规律是揭示损伤演化如何依赖于本构状态变量的函数关系的关键.由于对单个微裂纹行为的研究不能从微观层面反映整体损伤演化,需要从概率的角度研究材料损伤的整体演化行为.故利用  $f_p(\varepsilon)$  表示损伤分布的概率密度函数,则损伤变量  $D$  可通过名义应变和概率密度函数来表征,如式(3)所示

$$dD = f_p(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

研究<sup>[25-26]</sup>表明,Weibull 分布函数可以有效地描述材料的损伤随机性或非均匀性,故采用两参数 Weibull 分布函数来描述铝土尾矿泡沫轻质土因胞壁发生脆性断裂;微观和宏观裂纹延伸、扩展所引起的宏观损伤演化规律,概率密度函数的表达式如式(4)所示

$$f_p(\varepsilon) = \frac{m}{\lambda} \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m\right] \quad (4)$$

当应变水平达到  $\varepsilon$  时,将式(4)代入式(3)中并对损伤变量  $D$  进行积分计算,结果如式(5)所示

$$D = \int_0^\varepsilon f_p(\varepsilon) d\varepsilon = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m\right] \quad (5)$$

式中:  $m$  为 Weibull 函数的形状参数,用于控制曲线的形状,  $m > 0$ ;  $\lambda$  为 Weibull 函数的尺度参数,用于控制曲线的缩放,  $\lambda > 0$ .

由式(2)可知,只需得到材料的有效应力,就可以建立一维受压损伤唯象本构模型.对此,很多学者<sup>[21, 27-29]</sup>在多孔材料单轴受压力学行为上开展了较多研究,并根据抗压试验获取的应力-应变全曲线,提出了不同的本构模型,如常用的 Gibson 模型<sup>[21]</sup>、Avalle 模型<sup>[28]</sup>及 Wang 模型<sup>[29]</sup>.苏步云<sup>[24]</sup>研究认为, Gibson 模型虽然可以很好地描述各个阶段的特点,且各参数物理意义明确,但该模型  $\varepsilon_M$  和  $\varepsilon_i$  参数的确定过于复杂,此外,由于模型中各个阶段之间的交界处并不是光滑的,故其不能很好地反映出交界处曲线的实际特点.因此,主要详细介绍 Avalle 模型及 Wang 模型.

#### (1) Avalle 模型

Avalle 等<sup>[28]</sup>提出了一个多参数的非线性弹塑性唯象本构模型,该模型能够全面地描述多孔材料的典型三阶段变形特征,从而预测材料的单轴受压力学行为,具体表达式为

$$\bar{\sigma}(\varepsilon) = k_1(1 - e^{(-k_2/k_1)\varepsilon(1-\varepsilon)^{k_3}}) + k_4\left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^{k_5} \quad (6)$$

式中:  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  均为材料参数.式中第一项适用于材料的弹塑性阶段和平台阶段,而式中第二项适用于材料的密实化阶段.第一项的一些显著特征是模型所需特征的基础.

#### (2) Wang 模型

Wang 等<sup>[29]</sup>提出了五参数唯象本构模型,用来描述多孔材料的应力-应变关系,具体表达式为

$$\bar{\sigma}(\varepsilon) = p_1 \frac{e^{p_2 \varepsilon} - 1}{1 + e^{p_3 \varepsilon}} + p_4 \left( \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^{p_5} \quad (7)$$

式中:  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$  均为材料参数. 此外, 式(7) 还应满足如下关系

$$\bar{\sigma}(\varepsilon) \Big|_{\varepsilon=0} = 0 \quad (8)$$

$$E_c = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\partial[\bar{\sigma}(\varepsilon)]}{\partial \varepsilon} = \frac{p_1 p_2}{2} \quad (9)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 1} [\bar{\sigma}(\varepsilon)] = p_1 \cdot \text{const} + p_4 \cdot \infty \quad (10)$$

由式(8)~式(10)可知, 式(7)中的第一项主要描述材料弹塑性阶段及平台阶段, 第二项则主要描述材料的密实化阶段. 由式(9)可知, 初始阶段中的切线模量  $E_c$  由材料参数  $p_1$  和  $p_2$  共同控制, 并认为  $E_c$  等于弹性模量. 其中,  $p_1$  用于反映弹塑性阶段的材料强度; 而  $p_2$  和  $p_3$  控制平台阶段的应力走势, 当  $p_2 > p_3$  时, 表示应变硬化材料; 当  $p_2 = p_3$  时, 表示理想塑性材料; 当  $p_2 < p_3$  时, 表示应变软化材料. 此外, 材料参数  $p_4$  和  $p_5$  分别表示密实化阶段的开始及强度.

考虑到实际工程中, 材料应变过大会导致结构位移过大, 极易造成工程破坏, 故只考虑应力-应变曲线的弹塑性阶段和破坏平台阶段, 不考虑密实化阶段. 李光良等<sup>[30]</sup> 研究发现应变率在 0.01s~0.1s 之间变化时, 应变率对材料应力-应变曲线影响较小, 故可不考虑应变率对材料的影响. 故将式(6)和式(7)分别代入式(2)中, 就可以获得两种一维损伤本构模型, 可将其用来预测铝土尾矿泡沫轻质土的应力-应变关系. 采用 Avalle 模型和 Wang 模型对试验数据进行拟合, 并与试验结果进行对比, 拟合结果如图 7 和图 8 所示. 结果表明 Avalle 模型和 Wang 模型均能较好地反映铝土尾矿泡沫轻质土材料弹塑性阶段和平台阶段的变形特征, 但 Avalle 模型能更好地描述弹塑性阶段与平台阶段交界处的特点, 特别是泡沫轻质土材料在大应变条件下的整体应力-应变关系. 此外, Wang 模型对于平台阶段出现稍大一点的应变软化和应变硬化现象时拟合效果较差, Avalle 模型则能更好地描述这些行为,  $R^2$  接近于 1. 综上, Avalle 模型用于描述铝土尾矿泡沫轻质土的应力-应变关系

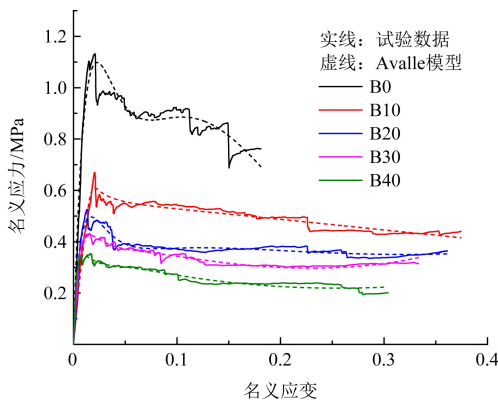


图7 Avalle 模型拟合结果与试验结果对比  
Fig.7 Comparison between the Avalle model fitting results and the experimental results

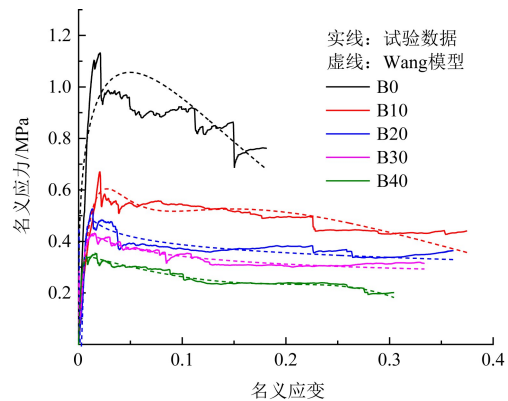


图8 Wang 模型拟合结果与试验结果对比  
Fig.8 Comparison between the Wang model fitting results and the experimental results

的效果要优于 Wang 模型.

此外,若不考虑材料的密实化阶段,基于 Avalle 模型建立的三参数模型如式(11)所示

$$\bar{\sigma}(\varepsilon) = k_1(1 - e^{(-k_2/k_1)\varepsilon(1-\varepsilon)^{k_3}}) \quad (11)$$

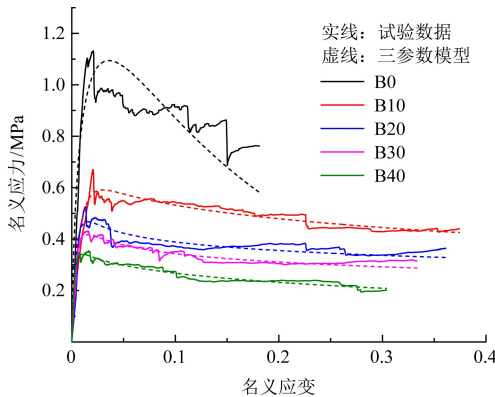


图9 三参数模型拟合结果与试验结果的对比  
Fig.9 Comparison between the Three-parameter model fitting results and the experimental results

将式(11)代入式(2)中,即可得到一维损伤唯象本构模型.采用三参数模型对铝土尾矿泡沫轻质土的名义应力-应变关系进行描述,如图9所示.由图9可知,三参数模型能较好地描述平台阶段,对于铝土尾矿泥掺量大于30%的铝土尾矿泡沫轻质土,三参数模型与 Avalle 模型均能很好地描述其弹塑性阶段和平台阶段的变形特征,但缺点是当铝土尾矿泥掺量小于30%时,三参数模型不能很好地描述材料弹塑性阶段与平台阶段过渡区域,特别是名义应力突然下降阶段得不到有效的表征,而且不能表征材料硬化或密实化现象.Avalle 模型、Wang 模型及三参数模型  $R^2$  值如表6所示,结果表明采

用 Avalle 模型拟合的  $R^2$  值均大于0.87,具有更好的适用性.

表6 各模型  $R^2$  值比较

Table 6 Comparison of  $R^2$  values of all models

铝土尾矿泥掺量	B0	B10	B20	B30	B40
Avalle 模型	0.89921	0.87585	0.86549	0.94191	0.94123
Wang 模型	0.52234	0.71404	0.83455	0.95002	0.94994
三参数模型	0.68589	0.69664	0.74152	0.91426	0.94269

因此,结合 Avalle 模型和 Weibull 函数,建立了铝土尾矿泡沫轻质土的一维受压损伤唯象本构模型,即将式(6)和式(5)代入式(2)中,结果如式(12)所示

$$\sigma_D(\varepsilon) = (1-D)\bar{\sigma}(\varepsilon) = \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m\right] \times \left[k_1(1 - e^{(-k_2/k_1)\varepsilon(1-\varepsilon)^{k_3}}) + k_4\left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^{k_5}\right] \quad (12)$$

不同铝土尾矿泥掺量对应的一维受压损伤唯象本构模型参数如表7所示.由2.1节可知,铝土尾矿泡沫轻质土28d无侧限抗压强度与铝土尾矿泥掺量具有很大的相关性,故认为模型参数与铝土尾矿泥掺量之间存在较好的相关性.为了得到模型参数与铝土尾矿泥掺量间的关系,将铝土尾矿泥掺量和模型参数进行拟合,拟合结果如图10所示.式(13)~式(19)描述了模型参数与铝土尾矿泥掺量关系.由各式可知, $R^2$ 值均大于0.987,说明模型参数与铝土尾矿泥掺量具有较好的相关性.将式(13)~式(19)代入式(12)中,即可建立与铝土尾矿泥掺量相关的铝土尾矿泡沫轻质土一维受压损伤唯象本构模型,用于描述铝土尾矿泡沫轻质土的应力-应变关系.

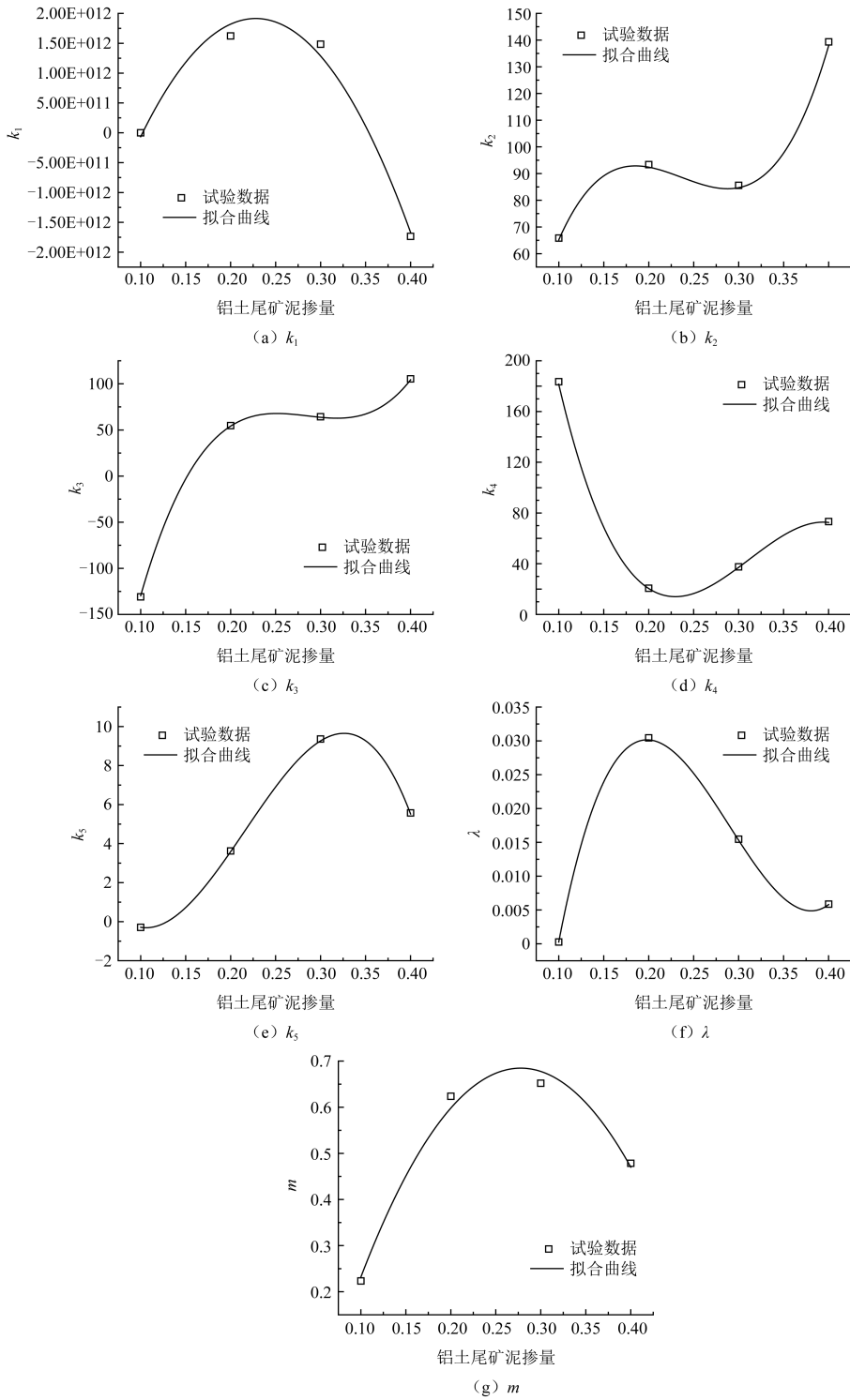


图 10 模型参数与铝土尾矿掺量的关系拟合

Fig. 10 Relationship between model parameters and BTs content

$$k_1 = -1.21x^2 + 5.52x - 4.37, R^2 = 0.988 \quad (13)$$

$$k_2 = 15963.98x^3 - 11323.34x^2 + 2551.78x - 92.7, R^2 = 0.998 \quad (14)$$

$$k_3 = 34233.17x^3 - 29254.73x^2 + 8218.4x - 693, R^2 = 0.999 \quad (15)$$

$$k_4 = -26507.92x^3 + 24794x^2 - 7194x + 679.57, R^2 = 0.999 \quad (16)$$

$$k_5 = -1871.35x^3 + 1212.9x^2 - 194x + 8.86, R^2 = 0.999 \quad (17)$$

$$\lambda = 8.34x^3 - 7.24x^2 + 1.89x - 0.124, R^2 = 0.999 \quad (18)$$

$$m = -14.35x^2 + 7.97x - 0.42, R^2 = 0.987 \quad (19)$$

式中: $x$ 表示铝土尾矿泥掺量,如10%、20%、30%和40%; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 、 $k_5$ 均为与铝土尾矿泥掺量有关的材料参数。

表7 不同铝土尾矿泥掺量对应的模型参数值

Table 7 Model parameter values corresponding to BTs content

铝土尾矿泥掺量/%	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$\lambda$	$m$
10	4.88656	65.83281	-130.96233	183.44529	-0.29178	2.65606E-4	0.2233
20	1.6221E12	93.33381	54.7253	20.69062	3.62344	0.03045	0.62373
30	1.48408E12	85.58334	64.35585	37.5172	9.35861	0.01546	0.65206
40	-1.73469E12	139.33279	105.4031	73.27095	5.57221	0.00586	0.47855

### 3 结论

制备了含不同铝土尾矿泥掺量的泡沫轻质土,通过单轴抗压试验探讨了铝土尾矿泥掺量对铝土尾矿泡沫轻质土抗压强度的影响,分析了材料的屈服破坏过程和相应的损伤失效机制.根据试验数据,两参数 Weibull 分布函数及多孔材料的本构模型,建立了无侧限抗压强度与铝土尾矿泥掺量的关系式,研究了适用于铝土尾矿泡沫轻质土材料的一维受压损伤唯象本构模型,得出主要结论如下:

(1) 铝土尾矿泡沫轻质土在  $500\text{kg}/\text{m}^3$  左右的低密度下强度达到  $0.31 \sim 0.71\text{MPa}$ , 7d 无侧限抗压强度达到 28d 无侧限抗压强度的  $73\% \sim 83\%$ . 铝土尾矿泡沫轻质土的 28d 无侧限抗压强度随着铝土尾矿泥掺量的增加呈指数型减小;

(2) 铝土尾矿泡沫轻质土单轴受压作用下主要包括弹塑性阶段和破坏平台阶段,且单轴受压破坏之后存在应变软化和应变硬化行为,破坏后仍具有较高的承载力,在受压载荷下具有明显的延性特征,其宏观失效形态主要由受剪损伤机制控制,表明铝土尾矿泡沫轻质土具备良好的缓冲性能;

(3) 通过对比 Avalle 模型、Wang 模型及三参数模型发现,三者均能较好地描述铝土尾矿泡沫轻质土材料弹塑性阶段和破坏平台阶段的变形特征,但 Avalle 模型对于平台阶段出现稍大一点的应变软化和应变硬化现象时拟合效果更优.根据 Weibull 分布函数和 Avalle 模型,研究了适用于铝土尾矿泡沫轻质土材料的一维受压损伤唯象本构模型,并建立了模型参数与铝土尾矿泥掺量的关系式,该关系式能很好地预测铝土尾矿泥掺量与铝土尾矿泡沫轻质土的关系,为铝土尾矿泡沫轻质土的优化设计及应用提供科学指导.

## 参考文献

- [ 1 ] 欧孝夺,彭远胜,莫鹏,等.掺铝土尾矿泡沫轻质土的物理力学及水力特性研究[J].材料导报,2020,34(增1):241-245  
Ou Xiaoduo, Peng Yuansheng, Mo Peng, et al. Study on the physical mechanical and hydraulic properties of foamed mixture lightweight soil mixed with bauxite tailings[J]. Materials Reports, 2020, 34(S1): 241-245
- [ 2 ] Li Z L, Zhang K F. Application and research on new technology of foam lightweight soil in treatment of soft soil foundation of railway engineering[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 204-208: 1622-1625
- [ 3 ] Cong M, Bing C. Properties of a foamed concrete with soil as filler[J]. Construction & Building Materials, 2015, 76(76): 61-69
- [ 4 ] Zhou C. Mechanical properties the cast in situ foamed lightweight soil[J]. Key Engineering Materials, 2016, 703: 411-415
- [ 5 ] Ng S C, Low K S, Tioh N H. Potential use of clayey soil in aerated lightweight concrete[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16(5): 809-815
- [ 6 ] Wang G C, Sha L, Jin F L. Study on the strength properties and failure mode of recycled sludge lightweight soil[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 275-277: 1281-1284
- [ 7 ] Shi X, Huang J, Su Q. Experimental and numerical analyses of lightweight foamed concrete as filler for widening embankment[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250(9): 118897
- [ 8 ] 赵武胜,陈卫忠,谭贤君,等.高性能泡沫混凝土隧道隔震材料研究[J].岩土工程学报,2013,35(8):1544-1552  
Zhao Wusheng, Chen Weizhong, Tan Xianjun, et al. High-performance foam concrete for seismic-isolation materials of tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1544-1552
- [ 9 ] 刘孟波,廖少明,陈立生,等.盾构在泡沫混凝土中的接收及现场实测分析[J].岩土工程学报,2020,42(11):2006-2014  
Liu Mengbo, Liao Shaoming, Chen Lisheng, et al. In-situ measurements of shield machine receiving in foamed concrete[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11): 2006-2014
- [ 10 ] Wang X, Han P, Bai X, et al. Influences of slag on properties of lightweight cement-treated soils subjected to sulfate corrosion[J]. Construction and Building Materials, 2019, 205(30): 511-518
- [ 11 ] She W, Du Y, Zhao G, et al. Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 153-166
- [ 12 ] Makul N, Sua-Iam G. Characteristics and utilization of sugarcane filter cake waste in the production of lightweight foamed concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 126(10): 118-133
- [ 13 ] Zhang Z, Provis J L, Reid A, et al. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymers foam concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62: 97-105
- [ 14 ] Khan Q S, Sheikh M N, McCarthy T J, et al. Experimental investigation on foam concrete without and with recycled glass powder: A sustainable solution for future construction[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 369-379
- [ 15 ] 苏建,曹斐妹,宋海农,等.铝土尾矿原位微生物选培及固化试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(5):1224-1234  
Su Jian, Cao Feimei, Song Hainong, et al. Experimental research on selection & cultivation and consolidation of in-situ microorganism in bauxite tailings[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(5): 1224-1234
- [ 16 ] Peng Y, Jiang J, Ou X, et al. Investigating the properties of foamed mixture lightweight soil mixed with bauxite tailings as filler[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 1-10
- [ 17 ] 土的工程分类标准:GB/T 50145—2007[S].北京:中国计划出版社,2007  
Engineering Classification Standard of Soil: GB/T 50145—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2007
- [ 18 ] 气泡混合轻质土填筑工程技术规程:CJJ/T 177—2012[S].中华人民共和国住房和城乡建设部,2012  
Technical specification for foamed mixture lightweight soil filling engineering: CJJ/T 177—2012[S]. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2012

- [19] Jones M R, McCarthy A. Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete[J]. *Fuel*, 2005, 84(11): 1398-1409
- [20] 叶华洋, 张伟锋, 韦未, 等. 激发剂-地聚合物对软土固化试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(4): 906-917  
Ye Huayang, Zhang Weifeng, Wei Wei, et al. Experimental study on the curing of soft soil with activator-geopolymer[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(4): 906-917
- [21] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structure and properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- [22] Lu G, Yu T X. Energy absorption of structures and materials[J]. *Energy Absorption of Structures and Materials*, 2003
- [23] 何俊, 王小琦, 石小康, 等. 碱渣-矿渣固化淤泥的无侧限抗压强度与微观特征[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(2): 376-386  
He Jun, Wang Xiaoqi, Shi Xiaokang, et al. Unconfined compressive strength and microscopic characteristics of soft soil solidified with soda residue and ground granulated blast furnace slag[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(2): 376-386
- [24] 苏步云. 泡沫混凝土力学性能及其弹塑性损伤本构研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017  
Su Buyun. Mechanical properties and elastoplastic damage constitutive model for foamed concrete[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017
- [25] Guo H, Guo W, Shi Y. Computational modeling of the mechanical response of lightweight foamed concrete over a wide range of temperatures and strain rates[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 622-631
- [26] 金浏. 细观混凝土分析模型与方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014  
Jin Liu. Study on meso-scope model and analysis method of concrete[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014
- [27] Liu Q, Subhash G. A phenomenological constitutive model for foams under large deformations[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2004, 44(3): 463-473
- [28] Avallè M, Belingardi G, Ibba A. Mechanical models of cellular solids: Parameters identification from experimental tests[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(1): 3-27
- [29] Wang Z H, Jing L, Zhao L M. Elasto-plastic constitutive model of aluminum alloy foam subjected to impact loading[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(3): 449-454
- [30] 李广良, 郭伟国, 赵融, 等. 轻质泡沫混凝土的力学性能与唯象本构模型[J]. *材料科学与工程学报*, 2012, 30(3): 428-431  
Li Guangliang, Guo Weiguo, Zhao Rong, et al. Mechanical properties and phenomenological constitutive model of lightweight foam concrete[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2012, 30(3): 428-431

# Uniaxial Compressive Mechanical Properties and Phenomenological Constitutive Model of Foamed Mixture Lightweight Soil with Bauxite Tailings

PENG Yuansheng<sup>1,2,3</sup>, OU Xiaoduo<sup>2</sup>, JI Fengling<sup>1,3</sup>

(1.College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2.College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

## Abstract

Bauxite tailings (BTs) is a common industrial waste. In order to make better use of BTs and reduce its pollution to the environment, a new type of foamed mixture lightweight soil (FMLS) with BTs was fabricated. The influence of BTs content on the compressive strength and failure mode of FMLS with BTs was studied in this paper. Based on the two-parameter Weibull distribution function, a one-dimensional compression damage constitutive model for FMLS with BTs was proposed. The results show that the unconfined compressive strength of FMLS with BTs decreases exponentially with the increase of BTs content. The 7d unconfined compressive strength up to 83% of the 28d unconfined compressive strength. Nominal stress-strain curves of the FMLS with BTs under uniaxial compression includes elastic-plastic stage and failure platform stage. FMLS with BTs exhibits strain-softening and strain hardening behavior after uniaxial compression failure, showing good cushioning properties. According to the Weibull distribution function and Avalle model, a one-dimensional compression damage phenomenological constitutive model for FMLS with BTs is investigated. The relationship between the model parameters and the BTs content is established, which provide a reference for the application of BTs in FMLS.

**Keywords:** bauxite tailings; foamed mixture lightweight soil; compressive strength; mechanical properties; phenomenological constitutive model