

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220824004

文章编号:1672-9331(2023)01-0032-08

引用格式:黄钰程,孙金钊,田盎然,等.城市生活垃圾焚烧炉渣路基填料的力学特性研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(1):32-39.

Citation: HUANG Yucheng, SUN Jinzhao, TIAN Angran, et al. Mechanical properties of municipal solid waste incineration as subgrade materials[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(1): 32-39.

城市生活垃圾焚烧炉渣路基填料的力学特性研究

黄钰程, 孙金钊, 田盎然, 唐强

(苏州大学 轨道交通学院, 江苏 苏州 215131)

摘要:【目的】城市生活垃圾焚烧炉渣(municipal solid waste incineration, MSWI)是生活垃圾焚烧后产生的一种高密实颗粒状材料。本文研究 MSWI 应用于路基材料时的强度和变形等力学特性。【方法】分别开展 MSWI 的材料特性分析, MSWI 的三轴剪切应力-应变分析, 以及基于离散元 PFC^{2D} 软件的 MSWI 循环三轴荷载模拟分析。【结果】MSWI 的材料特性满足路基填筑要求。在室内三轴剪切试验中, MSWI 峰值强度随着围压的增加不断提高; 而随含水率的增加, 先增大后减小。MSWI 的抗剪强度指标内摩擦角为 34.75°, 黏聚力为 54.13 kPa, 满足作为路基材料的要求。同时基于 PFC^{2D} 分析围压、偏应力对 MSWI 循环荷载永久变形的影响规律: 随着围压的增大, 轴向应变逐渐减小; 随着偏应力的增大, 轴向应变逐渐增加。【结论】MSWI 应用于路基填筑具有可行性, 本文结果可为后续研究 MSWI 工程应用提供参考。

关键词:城市生活垃圾焚烧炉渣(MSWI); 三轴试验; PFC^{2D}; 路基材料

中图分类号:U 414

文献标志码:A

0 引言

随着我国城市生活垃圾日益增多, 城市生活垃圾焚烧作为最常用的垃圾管理技术发挥着重要作用^[1]。根据《中国统计年鉴 2021》, 我国城市生活垃圾(municipal solid waste, MSW)焚烧量约为 14 600 万 t, 产生的城市生活垃圾焚烧炉渣(municipal solid waste incineration, MSWI)高达 2 900 万 t(见图 1)。但随着 MSWI 的日益增多, MSWI 处置也变得日趋困难。为提高城市生活垃圾管理的可持续性, 不断有学者研究将 MSWI 用作工程建设材料^[2-6]。

从外观上看, MSWI 是一种高密实颗粒状材料, 通过电子显微镜发现其颗粒表面布满了不规则的角状孔洞, 且其内部也有许多孔洞, 孔隙率较高^[7]。MSWI 的主要化学成分为 SiO₂、Al₂O₃、CaO 和

Fe₂O₃ 等, 各化学成分的质量分数见表 1。将 MSWI 与天然建筑骨料进行对比, 发现 MSWI 的基本物理性质、组成及粒径分布基本符合道路建设材料的要求^[8-10]。将其用于道路材料, 不仅用量大、成本低, 还可解决砂石材料日益紧缺的问题, 有助于实现城市废物的资源化利用和可持续发展。

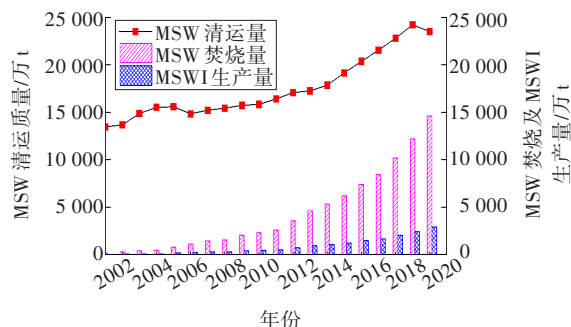


图1 我国 MSW 及 MSWI 产量

Fig.1 Output of municipal solid waste and waste MSWI of China

收稿日期:2022-08-24;修回日期:2022-10-03;接受日期:2022-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(52208360);江苏省自然科学基金项目(BK20210720);江苏省高等学校自然科学研究项目(19KJB580018)

通信作者:唐强(1985—)(ORCID:0000-0003-2751-2455),男,教授,主要从事岩土工程方面的研究。

E-mail:tangqiang@suda.edu.cn

表1 MSWI的主要化学成分的质量分数
Table 1 Main chemical composition of MSWI %

w (SiO_2)	w (Fe_2O_3)	w (Al_2O_3)	w (CaO)	w (MgO)	w (K_2O)	w (Na_2O)
56.7	6.1	13.8	9.7	2.9	2.6	1.9

近年来,不断有学者开展MSWI的工程应用特性研究。JUNG等^[11]研究了将MSWI应用于工程建设时其对周围环境造成的影响,结果表明,自然风化作用下,MSWI中的重金属氧化物渗透到周围环境中的风险处于较低水平。HJELMAR等^[12]通过风险评估的方法研究了MSWI应用于工程建设时对环境产生的影响,发现MSWI应用于道路建设对环境影响风险较低。ALLEGRINI等^[13]采用全生命周期研究方法,综合分析了MSWI在工程应用过程中的环境影响,认为MSWI可以用作混凝土骨料和路基工程填充材料。TANG等^[14]研究了MSWI混凝土,得出MSWI的基本物理力学性能满足工程应用,可以替代传统建筑材料。宋丹青等^[15-16]研究了粒径含量、含水率对MSWI强度特性的影响,MSWI强度随大颗粒含量的增加而减小,随含水率的增大呈先增加后减小的趋势。与标准砂相比,MSWI的应力-应变峰值出现较早。LE等^[17]通过三轴试验研究了MSWI的变形和强度特性,发现其泊松比、剪胀角、有效黏聚力和内摩擦角等力学参数与道路集料的力学参数基本一致,但受有效围压的影响较明显。此外,ARM^[18]通过对MSWI进行循环荷载三轴试验,得出在循环应力水平下,MSWI试样的弹性模量在60~140 MPa之间,与砂的弹性模量相当,但其塑性或永久变形略比砂的低;当MSWI中的有机质含量减半时,其弹性模量将增加50%左右。SORMUNEN等^[19]为研究MSWI在实际工程应用中的力学性能,分别修建了MSWI结构层和天然骨料结构层,对比分析其使用期间的力学性能。结果表明MSWI结构层的中下部结构性能与天然骨料的一致,可将MSWI用于道路和现场结构的较低结构层。如果MSWI用于基层,则建议加铺额外的天然骨料基层或采用较厚的沥青路面。现如今,不断有国内外学者开展MSWI道路工程实例研究^[20-22]。

目前,针对MSWI的研究多是基于室内试验的强度研究,未对MSWI填筑的路基长期路用特性进行深入研究,本文通过对MSWI试样进行不同含水率下的三轴剪切试验,分析了MSWI试样的应力-应

变曲线以及抗剪强度。同时采用颗粒流程序(PFC^{2D})建立MSWI的双轴循环荷载离散元模型,进而研究在不同围压、偏应力作用下MSWI填筑的路基永久变形特性,验证MSWI道路路基的长期路用性能。

1 试验材料与方法

1.1 MSWI的特性

本文以苏州吴中区七子山垃圾焚烧厂生产的MSWI为原料。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中的相关要求剔除原料杂质并进行筛分试验,颗粒筛分结果如图2所示,MSWI的不均匀系数 C_u 为10.0,曲率半径 C_c 为1.11 cm。根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中路基填料“宜选用级配较好的砾类土、砂类土等粗粒土作为填料”以及《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中提出的“砾类土同时满足 $C_u \geq 5.0$, $C_c = 1 \sim 3$ cm时为级配较好的砾类土”的要求,该MSWI集料可以用作我国路基填筑材料。通过击实试验,测得MSWI的击实试验曲线如图3所示,其最佳含水率约为10.8%,最大干密度约为1.76 g/cm³。

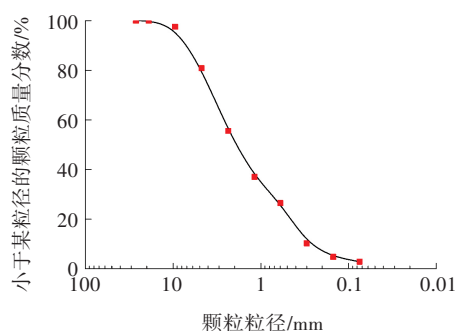


图2 MSWI的级配曲线

Fig. 2 Grading curve of MSWI

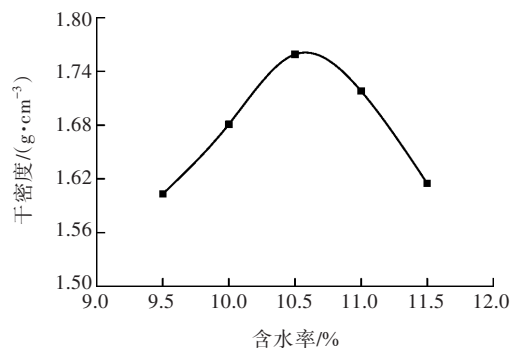


图3 MSWI的击实曲线

Fig. 3 Compaction curve of MSWI

1.2 试验方法

试验仪器采用型号为DYNTTS的GDS动三轴系统,该仪器主要构成如图4所示。首先,将从垃圾焚烧厂带回的MSWI放入温度为105℃的烘箱中烘干18 h以上,确保其达到完全干燥状态。然后,将MSWI过9.5 mm筛,根据试验方案要求完成制样工作。在实际工程中,路基往往经历复杂的环境影响,不同环境下路基填料的强度、变形和抗剪性能差别很大。因此,本文建立围压分别为28.0、50.0、75.0 kPa以及含水率为12.10%、9.68%、14.52%时的三轴压缩试验方案(见表2),其中,12.10%为最优含水量,9.68%为0.8倍的最优含水量,14.52%为1.2倍的最优含水量。研究不同影响因素下MSWI路基填料的强度特性,包括应力-应变曲线、抗剪强度参数等。本文三轴加载速率控制为0.7 mm/min,当应变量达到10%时,停止三轴试验,试验结束。

表2 三轴压缩试验方案

Table 2 Triaxial compression test scheme

序号	围压/kPa	含水率/%	压实度/%
1	28.0	12.10	96
2	50.0	12.10	96
3	75.0	12.10	96
4	28.0	9.68	96
5	28.0	14.52	96

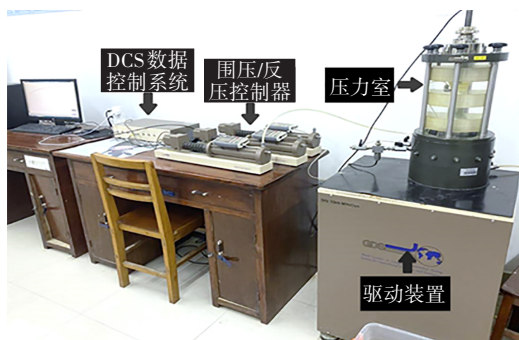


图4 GDS动三轴系统

Fig.4 GDS dynamic triaxial system

2 试验结果分析

图5为不同围压下含水率 w 为10.8%的MSWI的应力-应变试验结果。随着试验围压的增加,MSWI应力-应变曲线明显上移,峰值强度不断提高,即在相同的试验条件下,MSWI应力峰值随围压的增加而提高。在三轴剪切试验的初期,试样

处于弹性阶段,在轴向应变达到2%时开始逐渐过渡到塑性阶段,同时可以看出围压越大,塑性阶段出现越早。这是由于在三轴剪切试验中,围压的增加将对试样产生更大的侧向约束,产生等量轴向变形将需要更大的轴向应力,从而使MSWI更早达到塑性阶段。

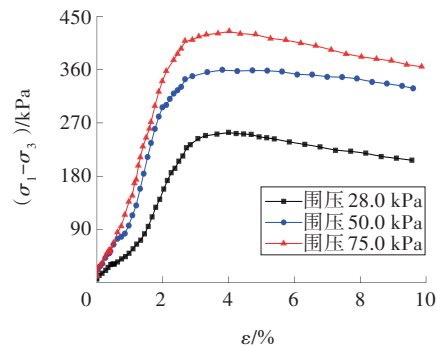


图5 不同围压下MSWI的应力-应变曲线

Fig.5 MSWI stress-strain curve under different confining pressures

图6为在围压28.0 kPa条件下不同含水率的MSWI的应力-应变试验结果。相较于围压的影响,含水率对三轴剪切试验前期影响较小。从图中可以看出,MSWI应力峰值随含水率的增加,先增大后减小,在最优含水率附近达到最大值。

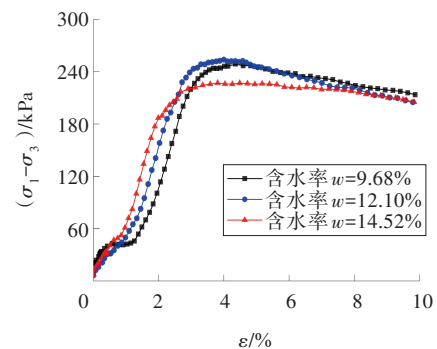


图6 不同含水率下MSWI的应力-应变曲线(围压28.0 kPa)

Fig.6 Stress strain curve of MSWI under different water content (confining pressure is 28.0 kPa)

MSWI填料的抗剪强度参数可根据强度理论和极限平衡条件绘制MSWI抗剪强度包络线得出,也可通过线性差值拟合得出。本文参考LE等^[17]采用的Lambe平面法更加快速直观地进行抗剪强度指标确定,如图7所示。通过式(1)拟合曲线从而求出MSWI的抗剪强度指标。

$$\begin{cases} t = s \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi \\ t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_1 为轴向应力; σ_3 为围压; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力。

拟合求得内摩擦角 $\varphi=34.75^\circ$,黏聚力 $c=54.13$ kPa。与传统建筑材料的抗剪强度指标进行对比,发现MSWI有着与传统材料相当的抗剪强度,同时有着更好的稳定性^[6]。

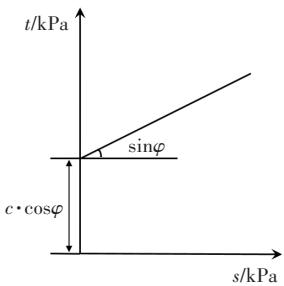


图7 Lambe 平面法

Fig.7 Lambe plane method

3 MSWI的PFC^{2D}三轴模拟

3.1 试验方法

将MSWI应用于路基填筑工程时,其路用性能往往与所能承受动荷载密切相关,因此有必要对MSWI在动荷载下的力学性质进行研究。本文采用离散元PFC^{2D}软件模拟MSWI在循环荷载下的永久变形规律。采用PFC^{2D}软件模拟循环加载主要通过位移和力两种方式,在研究中发现通过力控制循环加载模拟效果更好,因此本文通过生成Clump加载板控制力的循环加载,MSWI采用圆盘颗粒(ball)模拟,最终生成的试样如图8所示。

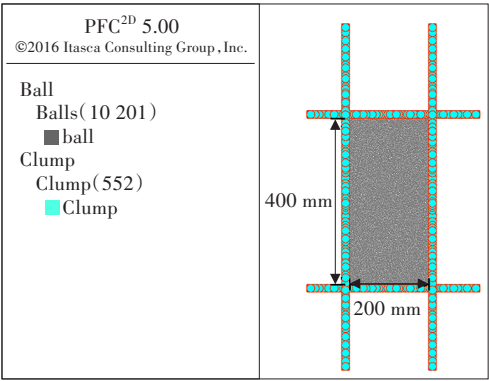


图8 MSWI试样的PFC^{2D}三轴数值模型

Fig.8 PFC^{2D} triaxial numerical model of MSWI specimen

在试验模拟中,ball-ball颗粒间的接触模型选用线性接触黏结模型(linearcbond model),ball-

Clump颗粒间的接触模型选用线性接触模型(linear model)。将上述试验获得的MSWI应力-应变变化曲线,结合文献[23-24]中颗粒流细观参数灵敏度研究,标定试样接触模型参数,见表3。

表3 PFC^{2D} ball-ball间接接触细观参数

Table 3 Meso parameters of PFC^{2D} ball-ball contact

细观参数	取值
颗粒半径分布/mm	1.0~1.8
有效弹性模量/Pa	1.5×10^7
刚度比	1.2
颗粒间摩擦系数	0.7
抗拉黏结强度/Pa	1.2×10^6
抗剪黏结强度/Pa	3.6×10^6

对建立的MSWI离散元双轴模型进行不同围压下的三轴剪切试验,并与室内三轴试验结果进行对比见图9,发现模拟三轴剪切试验应力-应变曲线的峰值、变化趋势与试验曲线的基本一致,可以认为建立的离散元模型能够有效反映MSWI三轴力学和强度特性。

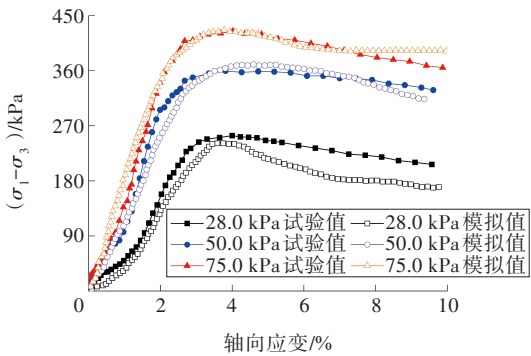


图9 不同围压下三轴剪切试验和模拟对比

Fig.9 Comparison of triaxial shear test and simulation under different confining pressures

完成模型验证后,开展循环加载试验。通过编写Fish函数完成循环应力加载。采用半正弦加载波,频率为10 Hz,1 000 s完成10 000次循环加载。

$$\sigma_d = \frac{\sigma_{\max}}{2} (1 - \cos 2\pi\omega t)$$
 (2)

式中: σ_d 为当前加载应力; σ_{\max} 为加载应力峰值; ω 为频率; t 为时间。

3.2 MSWI动荷载三轴模拟分析

通过建立的MSWI离散元双轴模型,开展循环荷载试验模拟,分析MSWI在循环荷载作用下的变化规律。图10为MSWI在循环荷载作用50次过程

中的应变发展曲线,由图10可以看出,循环荷载总轴向应变包含可恢复的弹性变形和累计塑性变形,随着加载次数的不断增多,累计塑性变形逐渐趋近于稳定。这与MSWI室内动力学试验特征较为符合^[25],因此该模型适用于动荷载下的MSWI力学性质研究。

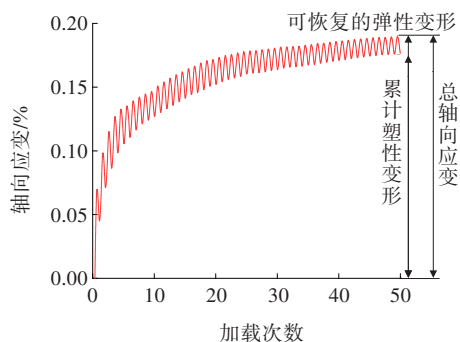


图10 循环荷载作用下MSWI的应变发展曲线

Fig.10 Strain development curve under MSWI cyclic load

MSWI道路在填筑时往往会面临更加复杂的动荷载问题,MSWI所产生的永久变形也会有较大差异,因此也需要研究围压、偏应力对MSWI永久变形的影响。国内外学者ZHAO等^[26]和张军辉等^[27]均通过路基土永久变形研究分别确定美国地区路基土所承受的围压为21.0 kPa左右,中国处于营运期间的路基填料围压为28.0 kPa左右。陈声凯等^[28]对国内道路结构进行统计研究,得到我国路基土的围压范围为0~70.0 kPa。通过综合分析,本文选取围压为28.0、50.0和75.0 kPa进行模拟研究。路基的循环荷载作用力通过偏应力大小表征,同时偏应力传导随着深度的增加逐渐降低。有学者研究得出,在标准轴载作用下路基土的应力一般处于30.0~60.0 kPa^[29];本文动三轴模拟试验考虑超载因素,因此永久变形试验的偏应力选取为28.0、48.0和68.0 kPa。

图11为模拟偏应力为28.0 kPa时,不同围压下轴向应变与加载次数关系曲线。由图11可以看出,各级围压下的轴向应变随加载次数的变化趋势基本一致,均为随着加载次数的增加应变逐渐增加至平缓,增加幅度先较快后减慢。同时,不同围压条件下,MSWI的抗压强度随围压的增加显著增强,在相同加载次数下轴向应变随着围压的增加逐渐减小。分析原因主要为:在相同条件下,试样围压越大,将产生越高密实程度的MSWI颗粒骨架,MSWI颗粒之间的相互接触就更加紧实,从而导致

试样更不易产生变形。在实际MSWI路基填筑时,可将MSWI集料应用于道路高围压结构层,即结构层下部——路基层。这将有利于提高道路结构的稳定性,大大改善道路在营运期间的沉降问题,这与前人的MSWI工程应用研究结论相符合^[19]。

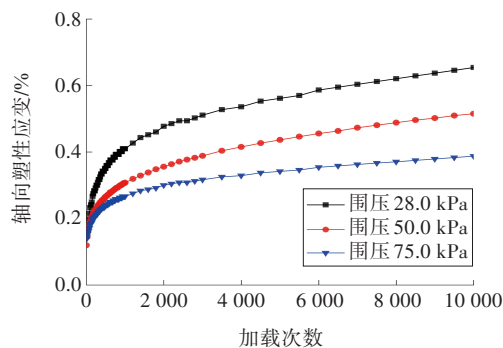


图11 不同围压下轴向塑性应变与加载次数关系曲线

Fig.11 Relationship curve between axial strain and loading times under different confining pressures

图12为模拟围压为28.0 kPa时,不同偏应力下轴向应变与加载次数关系曲线。由图12可以看出:各级偏应力下的轴向应变随加载次数的增加变化趋势基本一致,且偏应力越大,轴向应变越大;同时在高偏应力条件下,MSWI试样在循环加载前期的轴向应变增长幅度明显高于低偏应力条件下的增长幅度,且在较少加载次数下便可达到较高应变水平。当偏应力为68.0 kPa时,此时模拟MSWI路基材料处于超载作用下,发现随着加载次数的增加,轴向塑性应变明显提高。因此,MSWI路基在实际应用中,在相同的荷载次数下过大的偏应力将导致MSWI路基更易发生破坏,MSWI更适宜在重载、超载车辆较少的城市道路路基中应用;同时在道路运营期间,需限制重载、超载车辆通行,以减小重载、超载车辆对路基产生的破坏。

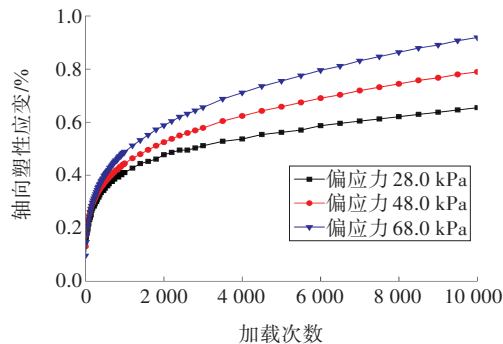


图12 不同偏应力下轴向塑性应变与加载次数关系曲线

Fig.12 Curve of axial plastic strain and loading times under different deviator stresses

通过上述模拟分析可知该MSWI材料循环荷载下轴向应变在0.3%~1.2%之间,这与PUPPALA等^[30]和胡焕校等^[31]研究的常规路基土循环荷载有着近似的载荷能力,MSWI未来可以作为新型路基材料进行应用。

4 结论

本文通过三轴剪切试验研究MSWI的强度特性指标,同时基于离散元软件PFC^{2D}进行MSWI循环三轴荷载试验,研究MSWI在动荷载作用下的永久变形规律,得出以下结论:

1) 通过三轴剪切试验研究MSWI在不同围压和含水率条件下的变化规律,发现随着围压的增加,MSWI应力-应变曲线明显上移,峰值强度不断提高;应力峰值随含水率的增加,先增大后减小。通过Lambe平面法测得该地区MSWI抗剪强度指标内摩擦角 $\varphi=34.75^\circ$,黏聚力 $c=54.13$ kPa。

2) 通过将试验获得的MSWI三轴剪切宏观参数与离散元细观颗粒参数相结合,建立基于PFC^{2D}的MSWI双轴细观模型。模拟分析不同围压下的MSWI应力-应变关系曲线,并将模拟结果与试验结果进行对比分析,发现基于PFC^{2D}的MSWI细观模型能较好地反映该MSWI的力学特征。

3) 通过PFC^{2D}模型分析围压、偏应力对MSWI动荷载永久变形的影响规律,得出随着围压的增大,MSWI的抗压强度明显增加,MSWI的轴向应变逐渐减小;而随着偏应力的增大,相同条件下MSWI所受到的载荷明显提升,导致轴向应变逐渐增加。

4) 本文将室内试验结果与离散元模拟结果相结合,对MSWI路基填料动、静力学行为进行研究,为后续研究MSWI工程应用提供参考。

〔参考文献〕

- [1] 李旦书.垃圾焚烧炉渣集料的组成特征[J].中国公路,2014(15): 134-135. DOI: 10.13468/j.cnki.chw.2014.15.083.
- LI Danshu. Composition characteristics of waste incineration slag aggregate[J].China Highway, 2014(15): 134-135.D0I:10.13468/j.cnki.chw.2014.15.083.
- [2] 范宇杰,陈萍,马文欣,等.城市生活垃圾焚烧炉渣作为

土木工程材料的资源化应用探讨[J].环境与可持续发展, 2012, 37(6): 97-99. DOI: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.2012.06.023.

FAN Yujie, CHEN Ping, MA Wenxin, et al. Discussion on resource application of municipal solid waste incineration slag as civil engineering material[J]. Environment and Sustainable Development, 2012, 37(6): 97-99. DOI: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.2012.06.023.

- [3] 《中国公路学报》编辑部.中国路基工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(3):1-49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.001.
- Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's subgrade engineering Research·2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 1-49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.001.
- [4] 黄大维,徐长节,刘香,等.高炉渣改良填料大型直剪试验分析[J].中国公路学报,2020,33(2):64-72. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.02.006.
- HUANG Dawei, XU Changjie, LIU Xiang, et al. Features of large direct shear test for the improved filler from blast-furnace slag[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 64-72. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.02.006.
- [5] XIANG G S, SONG D Q, CHEN Z. Investigated stress-strain relationships of municipal solid waste incineration bottom ash[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 2431-2448. DOI: 10.1080/19475705.2020.1845823.
- [6] VAITKUS A, GRAŽULYTĖ J, VOROBJOVAS V, et al. Potential of MSWI bottom ash to be used as aggregate in road building materials[J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2018, 13(1): 77-86. DOI: 10.3846/bjrbe.2018.401.
- [7] XIE R F, XU Y F, HUANG M, et al. Assessment of municipal solid waste incineration bottom ash as a potential road material[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(4): 992-998. DOI: 10.1080/14680629.2016.1206483.
- [8] LUO H L, CHEN S H, LIN D F, et al. Use of incinerator bottom ash in open-graded asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 497-506. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.164.
- [9] YAN K Z, GAO F Q, SUN H, et al. Effects of municipal solid waste incineration fly ash on the characterization of cement-stabilized macadam[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 181-189. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.048.
- [10] ASHRAF M S, GHOLEH Z, SHAO Y X. Production of eco-cement exclusively from municipal solid waste incineration residues[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 149: 332-342. DOI: 10.1016/j.resconrec.

- 2019.06.018.
- [11] JUNG C H, MATSUTO T, TANAKA N, et al. Metal distribution in incineration residues of municipal solid waste (MSW) in Japan[J]. *Waste Management*, 2004, 24(4):381–391. DOI:10.1016/S0956-053X(03)00137-5.
- [12] HJELMAR O, HOLM J, CRILLESSEN K. Utilisation of MSWI bottom ash as sub-base in road construction: first results from a large-scale test site[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 139(3): 471–480. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.059.
- [13] ALLEGRI E, VADENBO C, BOLDRIN A, et al. Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 151:132–143. DOI:10.1016/j.jenvman.2014.11.032.
- [14] TANG Q, LIU Y, GU F, et al. Solidification/stabilization of fly ash from a municipal solid waste incineration facility using Portland cement[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016: 7101243. DOI: 10.1155/2016/7101243.
- [15] 宋丹青, 项国圣. 城市垃圾炉渣变形特性的三轴试验[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(7):116–122. DOI:CNKI:SUN:HNLG.0.2016-07-018.
- SONG Danqing, XIANG Guosheng. Triaxial tests of deformation characteristics of bottom ash from municipal solid waste incineration[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(7):116–122. DOI:CNKI:SUN:HNLG.0.2016-07-018.
- [16] 宋丹青, 宋宏权, 项国圣, 等. 含水率对生活垃圾炉渣强度特性的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(1): 150–156. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2017.01.019.
- SONG Danqing, SONG Hongquan, XIANG Guosheng, et al. Influence of water contents on strength characteristics of municipal solid waste incineration bottom ash[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2017, 44(1): 150–156. DOI: 10.16339/j. cnki. hdxzbkb. 2017. 01.019.
- [17] LE N H, ABRIAK N E, BINETRUY C, et al. Mechanical behavior of municipal solid waste incinerator bottom ash: results from triaxial tests[J]. *Waste Management*, 2017, 65:37–46. DOI:10.1016/j.wasman.2017.03.045.
- [18] ARM M. Variation in deformation properties of processed MSWI bottom ash: results from triaxial tests[J]. *Waste Management*, 2004, 24(10): 1035–1042. DOI: 10.1016/j.wasman.2004.07.013.
- [19] SORMUNEN L A, KOLISOJA P. Construction of an interim storage field using recovered municipal solid waste incineration bottom ash: field performance study [J]. *Waste Management*, 2017, 64:107–116. DOI:10.1016/j.wasman.2017.03.014.
- [20] 刘栋, 李立寒. 旋转压实成型水泥稳定类基层材料试验[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(11): 118–128. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.11.011.
- LIU Dong, LI Lihan. Experiment on gyratory compaction of cement stabilized base course materials[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(11): 118–128. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.11.011.
- [21] TASNEEM K M, NAM B H, EUN J. Sustainable utilization of MSWI bottom ash as road construction materials, part II: chemical and environmental characterization[C]//*Airfield and Highway Pavements*. 2015. Miami, Florida. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2015:593–604.
- [22] 谭巍, 李菁若, 季炜, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰在沥青混合料中的应用[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(4):14–21. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.04.003.
- TAN Wei, LI Jingruo, JI Wei, et al. Application of municipal solid waste incinerator fly ash in asphalt mixture[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(4): 14–21. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372. 2016.04.003.
- [23] 张远博, 冯兴波, 徐永福. 垃圾炉渣力学性质的颗粒流模拟[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(19):72–77. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2017.19.012.
- ZHANG Yuanbo, FENG Xingbo, XU Yongfu. Simulation of mechanical behaviour for municipal solid waste by discrete element method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(19): 72–77. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815.2017.19.012.
- [24] 刘勇, 朱俊樸, 闫斌. 基于离散元理论的粗粒土三轴试验细观模拟[J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11(4):58–62. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7029.2014.04.010.
- LIU Yong, ZHU Junpu, YAN Bin. Meso-mechanical simulation study on triaxial test of coarse-grained soil based on DEM[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, 11(4): 58–62. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-7029.2014.04.010.
- [25] 顾欢达, 李翠, 薛国强. MSWI混合土在动力荷载作用下的变形特性试验研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(3): 38–42, 88. DOI: 10.3969/j. issn. 1674-0696.2016.03.08.
- GU Huanda, LI Cui, XUE Guoqiang. Deformation properties of MSWI mixed soil under cyclic dynamic loading[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2016, 35(3):38–42, 88. DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2016.03.08.
- [26] ZHAO Y S, DENNIS JR N D, ELLIOT R P. Prediction of subgrade permanent strain using simple soil properties [C]//*GeoTrans*. 2004. Los Angeles, California, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2004: 1076–1085.
- [27] 张军辉, 尹志勇, 郑健龙. 南方湿热地区路基红黏土 Shakedown 临界应力水平试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(4):1288–1292. DOI:CNKI:SUN:ZNGD.0.2014-04-038.

- ZHANG Junhui, YIN Zhiyong, ZHENG Jianlong. Research on critical stress level of Shakedown of red clay in southern hot and humid areas[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(4): 1288-1292. DOI: CNKI: SUN: ZNGD. 0. 2014-04-038.
- [28] 陈声凯,凌建明,张世洲.路基土动态回弹模量室内试验加载序列的确定[J].公路,2006,51(11):148-152.
CHEN Shengkai, LING Jianming, ZHANG Shizhou. Fixing loading sequence for resilient modulus test of subgrade soil[J]. Highway, 2006, 51(11): 148-152.
- [29] 周宇.湿热地区路基湿度分布及刚度的湿度依赖性研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
ZHOU Yu. Research on subgrade moisture distribution and stiffness of humidity dependence in hot and humid areas[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [30] PUPPALA A J, CHOMTID S, BHADRIRAJU V. Using repeated-load triaxial tests to evaluate plastic strain potentials in subgrade soils[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1913(1): 86-98. DOI: 10.1177/0361198105191300109.
- [31] 胡焕校,段旭龙,何忠明,等.动三轴CT条件下粗粒土填料的力学特性与细观力学性能分析[J].中国公路学报, 2018, 31(11): 42-50. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-7372.2018.11.005.
HU Huanxiao, DUAN Xulong, HE Zhongming, et al. Mechanical properties and meso mechanical performance evaluation of coarse-grained soil fillers based on dynamic triaxial CT test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 42-50. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.11.005.

Mechanical properties of municipal solid waste incineration as subgrade materials

HUANG Yucheng, SUN Jinzhao, TIAN Angran, TANG Qiang

(School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215131, China)

Abstract: [Purposes] Municipal solid waste incineration (MSWI) is a kind of highly dense granular material produced after domestic waste incineration. This work aims to study the strength and deformation characteristics of MSWI applied as subgrade materials. [Methods] The characteristics of MSWI are investigated by laboratory triaxial shear stress-strain test and cyclic triaxial load simulation based on discrete element PFC^{2D}. [Findings] The mechanical characteristics of the MSWI generally meet the requirements of subgrade filling. In the triaxial shear test, the peak strength of MSWI increased with the enhancement of confining pressure; With the increase of water content, the shear strength increased at first and then decreased. The measured internal friction angle of the MSWI index is 34.75° , and the cohesion is 54.13 kPa, which meets the parameters required by subgrade materials. At the same time, based on PFC^{2D} model, the influence of confining pressure and deviator stress on the permanent deformation of MSWI under cyclic load is analyzed. It is concluded that with the increase of confining pressure, the axial strain gradually decreases, while with the rising deviator stress, the axial strain increases gradually. [Conclusions] The application of MSWI as subgrade filling has certain feasibility, which provides a reference for further study on the engineering application of MSWI.

Keywords: MSWI; triaxial test; PFC^{2D}; subgrade material

Manuscript received: 2022-08-24; **revised:** 2022-10-03; **accepted:** 2022-10-08

Foundation item: Project (52208360) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (BK20210720) supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province; Project (19KJB580018) supported by the Natural Science Foundation for Colleges and universities of Jiangsu Province

Corresponding author: TANG Qiang (1985—) (ORCID: 0000-0003-2751-2455), male, professor, research interest: geotechnical engineering. E-mail: tangqiang@suda.edu.cn

(责任编辑:赵冰;校对:刘平;英文编辑:田湘)