

含水率对生活垃圾炉渣强度特性的影响^{*}

宋丹青¹, 宋宏权^{2†}, 项国圣¹, 冯兴波¹

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030;

2. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室 河南大学, 河南 开封 475004)

摘要:生活垃圾炉渣可以作为新型路基材料使用,为研究含水率对其强度特性的影响,首先对其材料特性进行分析,其次对含水率10%~20%范围内的垃圾炉渣进行超声波波速试验、饱和三轴固结排水剪切试验及无侧限抗压强度试验.结果表明:垃圾炉渣的主要成分为SiO₂,最佳含水率约为15.5%,最大干密度约为1.52 g·cm⁻³,属于级配良好砾类土;含水率对垃圾炉渣的强度具有影响,含水率10%~20%范围内的垃圾炉渣的超声波波速、最大主应力差及单轴抗压强度随初始制样含水率的增加表现为先增加后减小的趋势,含水率约15%时达到峰值;基于弹性理论,得到了不同含水率时炉渣的泊松比、粘聚力及单轴抗压强度的关系,可为深入分析炉渣的强度特性提供理论依据.

关键词:垃圾炉渣;强度特性;含水率;泊松比

中图分类号:U414

文献标志码:A

Influence of Water Contents on Strength Characteristics of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash

SONG Danqing¹, SONG Hongquan^{2†}, XIANG Guosheng¹, FENG Xingbo¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions of Ministry of Education, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: Since Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) bottom ash can be used for a new roadbed material, in order to study the influence of water contents on the strength properties of MSWI bottom ash, the material characteristics were firstly examined. The ultrasonic wave velocity tests, saturated consolidated drained triaxial compression tests, and unconfined compressive strength tests were carried out within the water contents range of 10% to 20%. The results show that the main components of MSWI bottom ash is SiO₂, and the best moisture content is about 15.5% with the largest dry density of about 1.52 g·cm⁻³, which are for well graded gravel soils. Meanwhile, the water content shows significant influence on the strength of MSWI bottom ash, where the ultrasonic wave velocities, uniaxial compressive strength and maximum principal stress difference firstly increase with the water increasing contents, and then gradually decrease, which reaches the maximum values with a water content of approximately 15%. Based on the elastic theory, the relationship between the Poisson's ratio, cohesive force and uniaxial compressive strength of MSWI bottom ash under condition of different water contents was obtained, which provides theoretical basis for further analysis on the strength of MSWI bottom ash.

^{*} 收稿日期:2015-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41401107), National Natural Science Foundation of China(41401107)

作者简介:宋丹青(1989-),男,河南郑州人,上海交通大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: hqsong@henu.edu.cn

Key words: MSWI bottom ash; strength property; water content; Poisson's ratio

目前我国城市生活垃圾主要采用填埋进行处理,随着垃圾炉渣的日益增多,并且含有对环境威胁的有毒微量元素^[1],垃圾炉渣处置问题也变得日趋困难^[2],因此,采取环境友好的处理方式显得尤为重要。垃圾炉渣的物理、工程性质与天然骨料相似,可用于新型建筑替代材料^[3]。由于我国公路的大规模建设导致道路建设材料日益短缺,若能将垃圾炉渣作为铺路的替代材料,既可缓解道路建设材料的短缺问题,又可节省用以填埋的土地资源^[4]。

垃圾炉渣用于新型建筑材料的资源化利用及其工程特性的研究已取得初步的研究成果。在国内,陈德珍等^[2]从能源消耗及环境排放等方面,研究了采用垃圾炉渣替代部分碎石集料铺路的可行性;张涛等^[4]研究了将垃圾炉渣用于混凝土的可行性及其最佳替代率等问题;谢燕等^[5]研究了垃圾炉渣用作混合料对水泥性能及对环境的安全性影响;石爱娟等^[6]对垃圾炉渣的物理及化学性质进行了分析,探讨了将其用作路基集料的可行性。刘栋等^[7]以垃圾炉渣集料替代天然集料制备水泥稳定炉渣碎石试验,分析了炉渣集料粒径及养护龄期等对其强度性能的影响。在国外,Dermatas 等^[8]探讨了垃圾炉渣在受重金属污染的土壤中的应用,Chimenos 等^[9]、Ferraris 等^[10]和 Sorlini 等^[11]针对炉渣混凝土的物理、化学及力学特性等方面的研究也取得初步的成果;Hjelmar 等^[12]针对将垃圾炉渣用于道路建设对环境的影响进行了风险评估;Becquart 等^[13]针对垃圾炉渣进行了饱和固结排水三轴试验,分析了垃圾炉渣的体应变变化规律;Zekkos 等^[14]采用饱和三轴固结排水试验得到了垃圾炉渣的粘聚力及内摩擦角。在国外,垃圾炉渣已经开始被用于道路建设,例如丹麦^[12]和荷兰^[15]。

针对垃圾炉渣的研究多是基于其工程应用,而未对其强度特性进行深入研究,尤其是含水率对其强度的影响。首先对垃圾炉渣的材料特性进行分析,针对不同含水率的炉渣试样进行超声波波速测定试验、饱和固结排水三轴试验及无侧限抗压强度试验,探讨了不同含水率对其强度特性的影响。基于弹性理论建立炉渣的泊松比、粘聚力及单轴抗压强度间的关系,为其在路基工程中的应用提供依据。

1 材料特性

1.1 化学性质

本文选用的生活垃圾炉渣取自江苏某垃圾发电

厂,采用 PANalytical X'pert PRO 型 X 射线衍射仪进行了 XRD 测定。由图 1(a)^[16]可知,垃圾炉渣的主要成分为 SiO_2 , CaO , Al_2O_3 和 Fe_2O_3 (表 1),同时含有少量 Ca^+ , Na^+ , K^+ , Mg^+ 。由图 1(a)可知, SiO_2 的衍射峰较为明显、尖锐,表明其矿物组成主要为结晶良好的 SiO_2 ,含有少量的 CaCO_3 , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 。炉渣的 XRD 图片衍射峰尖锐,馒头峰很弱,表明炉渣内含有极少量的非结晶玻璃体^[5]。

表 1 试验垃圾炉渣的化学成分

Tab. 1 The chemical components of MSWI bottom ash

成分	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	烧失量
含量/%	49.1	14.3	3.6	3.01	1.06	1.69	4.45

1.2 物理性质

垃圾炉渣呈黑褐色,含水率为 10%~20%。采用 Philips XL30 型扫描电镜对其表面形貌进行观测(图 1(b))^[5],并对炉渣进行 SEM 分析可知,炉渣颗粒呈不规则角状,较多的小颗粒粘附在大颗粒表面,高倍放大后可见少量的粒状及片状的结晶物。垃圾炉渣的颗粒分布曲线如图 2(a),其中液限为 39.4%,塑限为 13.5%。采用电动击实仪及 T0131-2007 击实试验中的重型击实试验方法,炉渣的击实试验曲线如图 2(b)所示,测得最佳含水率约为 15.5%,最大干密度约为 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,这与已有文献结果相近^[17]。该炉渣属于级配良好砾类土,其级配组成满足《公路路基设计规范》。由炉渣的击实曲线可知,最佳含水量之前的含水量曲线较陡,但是大于最佳含水量后曲线则较缓。由此可知,炉渣在含水率变化较大的范围内,表现出了较好的压实性能。

2 试验制备和试验方法

本试验采用粒径 2 mm 内的炉渣,试样制备方法如下:首先均匀拌和加水后的炉渣,按照不同干密度及含水率在试样模中分 5 层击实,每层用击锤使其接触密实,然后把接触面轻刮一下,使每两层接触紧密,以免造成装样分层现象。试样制备完成后放在室内进行养护,待达到养护龄期后将其从试样模中取出,并准确测量其高度、直径及重量。

超声波试验方法如下:首先对 NM-4A 超声检测分析仪进行调试,将试样的尺寸准确输入检测分

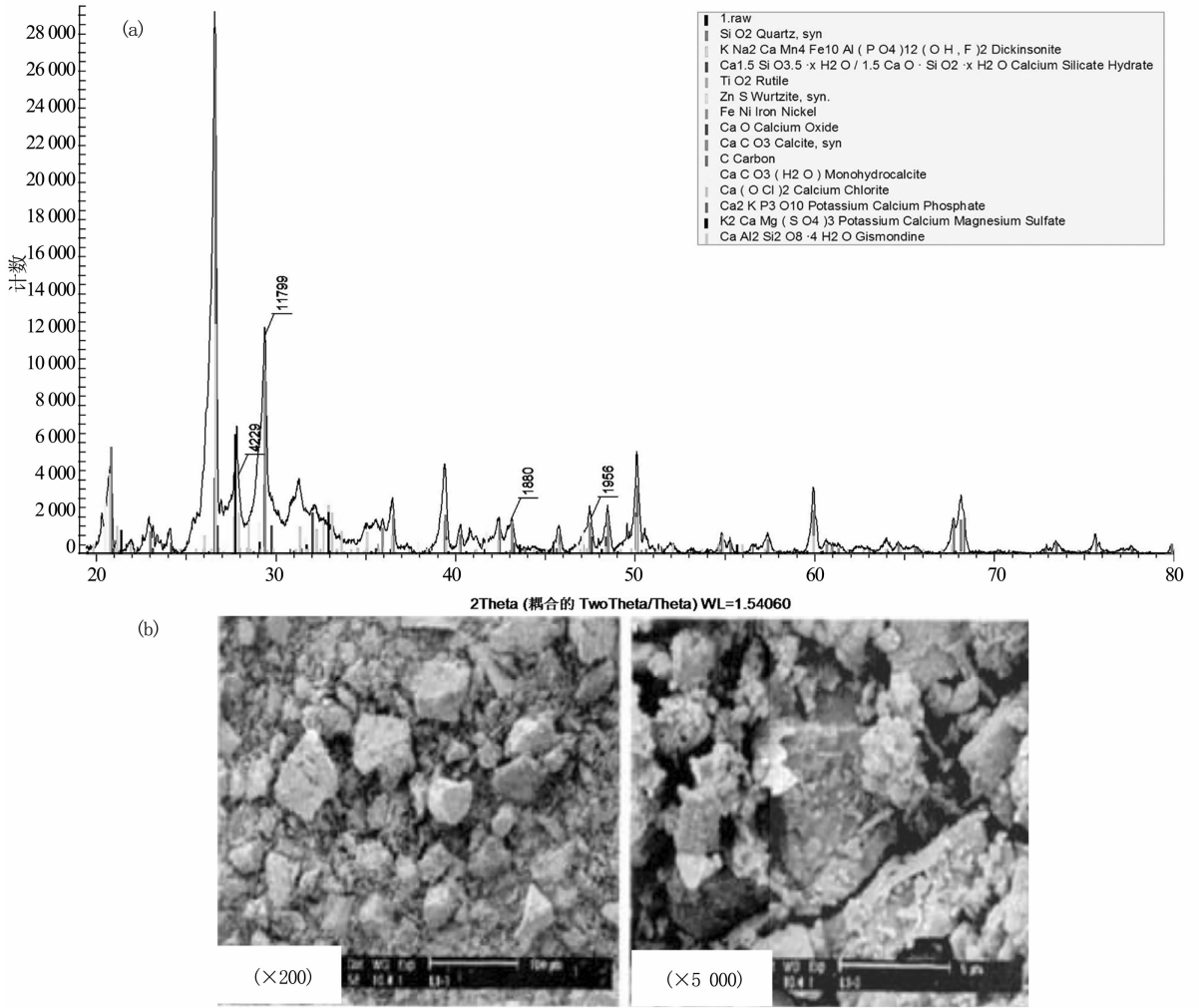


图1 (a)炉渣的XRD图;(b)垃圾炉渣的SEM图
Fig.1 (a)XRD pattern of MSWI bottom ash; (b)SEM graphs of MSWI bottom ash

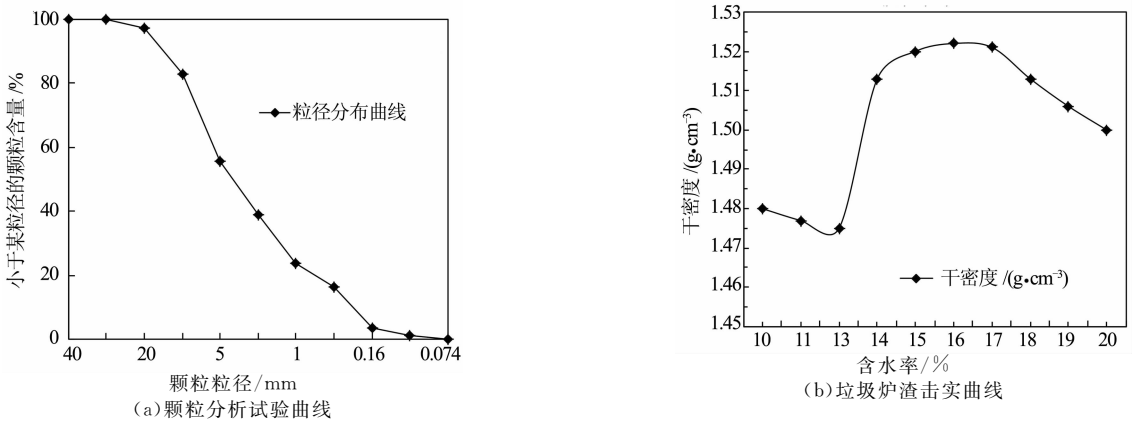


图2 (a)颗粒分析试验曲线;(b)垃圾炉渣击实曲线
Fig.2 (a)Gradation curves of MSWI bottom ash; (b)The compaction curve of MSWI bottom ash

析仪,开始进行超声波测量.当检测分析仪界面的波形出现标准波形时,可以开始采样进行纵波及横波的数据采集,横波波速采用转换器获得.采用SJ-IA

G型三轴剪力仪,针对不同初始制样含水率的炉渣进行饱和和固结排水试验.试验方法如下:首先将炉渣试样放入真空饱和装置,然后开启真空泵进行抽气

饱和,在试样抽气饱和 12 h 后将炉渣试样取出放置于三轴仪内,设置围压后打开围压阀,关闭反压阀及排水阀进行固结,待试样固结 12 h 后开始进行试验,采用 TSW-5 土工试验维基数据采集与处理系统进行数据采集.限于篇幅原因,无侧限抗压试验的试验方法不再赘述.

3 试验结果

3.1 超声波试验

超声波在试样中的传播速度可以反映材料的强度特性^[18-19].由于炉渣的超声波纵波及横波波速变化规律相似,为方便分析,以炉渣的纵波波速为例,不同含水率炉渣的纵波波速见图 3,纵波波速随干密度的增加而增加,随养护龄期的增加而变大.含水率 10%~20% 范围内,纵波波速随含水率的增加呈先变大再减小的变化趋势,含水率约 15% 时达到峰值,含水率 15%~17% 范围内波速减小速率最快,含水率 20% 时的波速最小.干密度 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,含水率对炉渣的波速影响最小.例如龄期 7 天时,干密度 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 纵波波速的最大与最小值相差约 60 m/s,干密度 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 相差约为 25 m/s,干密度 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 相差约为 45 m/s.

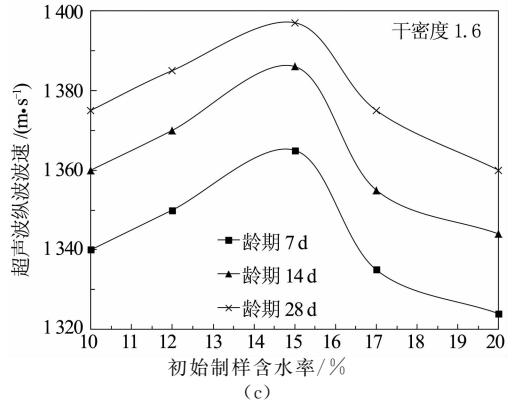
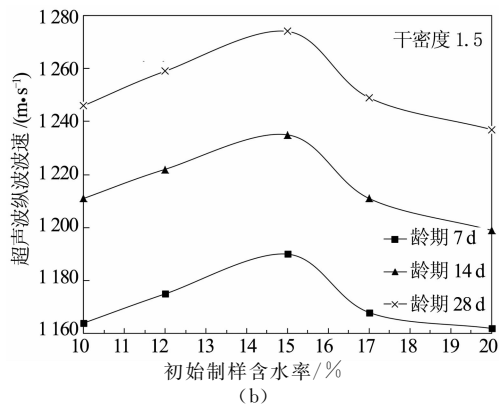
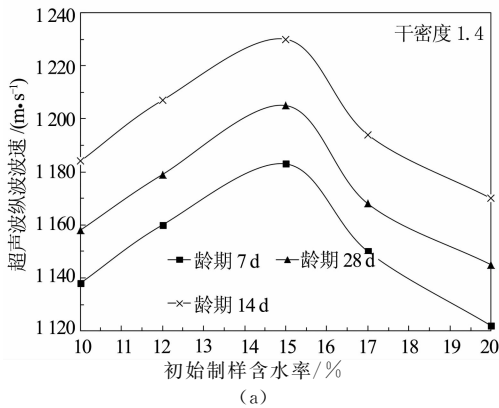


图 3 不同含水率时的纵波波速
Fig. 3 The P wave velocities under different water contents

3.2 饱和三轴固结排水试验

3.2.1 应力-应变关系

初始制样含水率对炉渣强度影响较大,以干密度 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的炉渣试样为例,绘制龄期 3 天围压 100 kPa 和 200 kPa 时不同初始制样含水率的应力-应变关系曲线(图 4),其粘聚力和内摩擦角的变化见表 2.由图 4 可知,初始制样含水率 15% 时的主

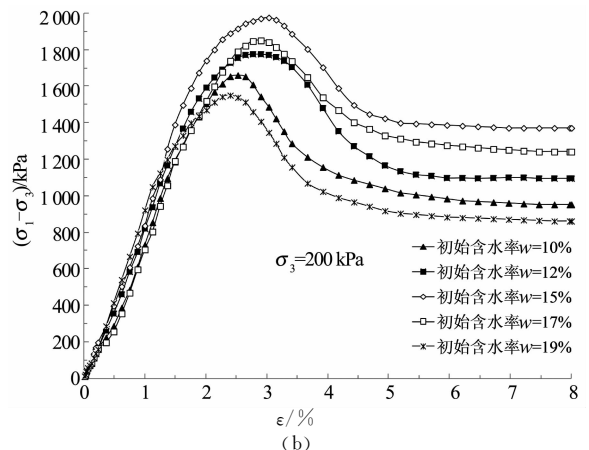
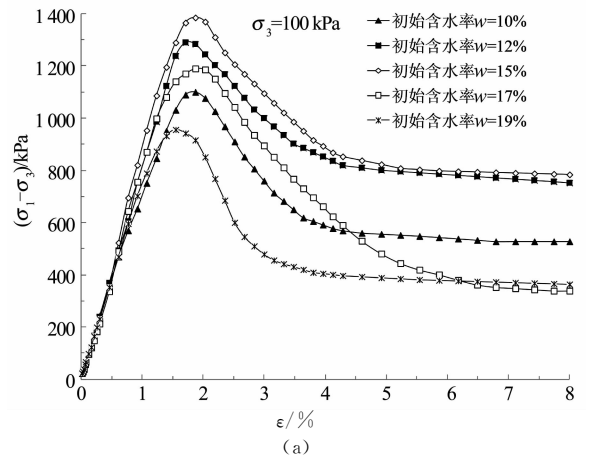


图 4 不同初始含水率应力-应变曲线
Fig. 4 Curves of stress-strain of slag samples with different initial moisture content

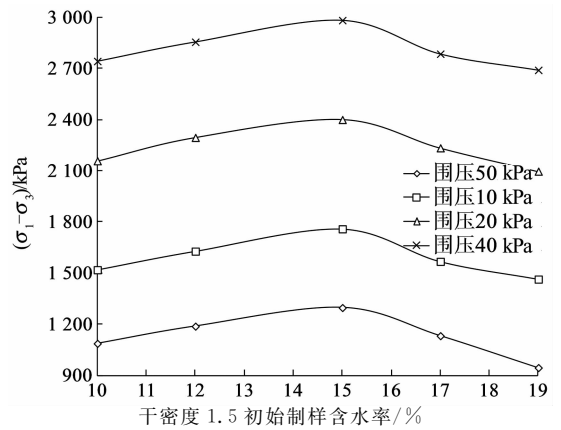
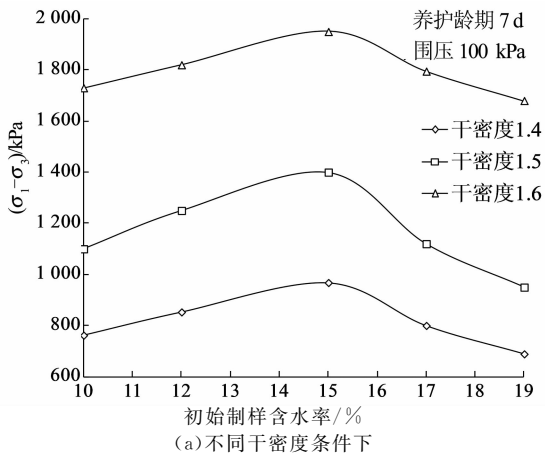
应力差峰值最大,其次为12%和17%,初始含水率19%时最大主应力差最小.由此可知,随着初始含水率的增加,炉渣的强度表现为先增加后降低的趋势,其主应力差峰值应变均在1.5%~2%范围内,其应力应变曲线均表现为应变软化型.由于篇幅有限,炉渣的有效应力变化不再绘出,有效应力比随围压的增大而减小,随着初始制样含水率的增加,有效应力比峰值先增加后减小,初始含水率约15%时,有效应力比达到峰值.由表2可知,粘聚力及内摩擦角随初始制样含水率的增加随之变大,含水率15%后随之变小,这与Zekkos等^[14]的试验结果相近.

表2 龄期3 d干密度1.5时的粘聚力及内摩擦角
Tab.2 The cohesive force and angle of internal friction with dry density 1.5 and curing age 3 days

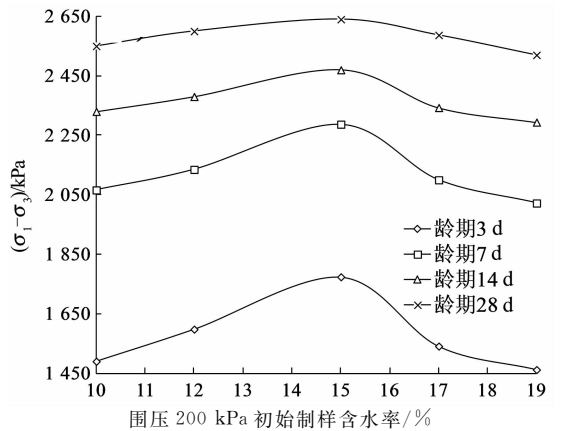
参数	含水率/%				
	10	12	15	17	19
内摩擦角/°	42.6	43.7	44.6	42.9	41.8
粘聚力/kPa	53.1	53.5	54.3	53.2	52.4

3.2.2 最大主应力差变化

最大主应力差随初始制样含水率的变化如图5所示.由图5(a)可知,以龄期7天为例,不同干密度的最大主应力差随初始制样含水率增加表现为先增大后减小的趋势,含水率约15%时达到峰值.由图5(b)可见,以干密度1.5龄期14 d的炉渣试样为例,最大主应力差随围压增加而增加;相同围压下随着初始含水率的增加,最大主应力差先增加后减小,含水率19%时最小.由图5(c)可知,以干密度1.5围压200 kPa时的试样为例,最大主应力差随养护龄期的增加而增加.值得注意的是其最大主应力差随龄期的增加,受初始制样含水率的影响而逐渐减小.例如龄期3 d时,最大主应力差的峰值与最小值相差约300 kPa,龄期7天时相差约200 kPa.



(b)不同围压条件下



(c)不同龄期条件下

图5 炉渣最大主应力差随含水率变化曲线
Fig.5 The change curves of maximum principal stress difference with different moisture content

3.3 无侧限试验

以干密度 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 龄期3 d的试样为例,进行无侧限抗压强度试验可知,含水率约15%时的单轴抗压强度最大,含水率13%时降低约为0.3 kN,含水率17%比含水率13%降低约0.2 kN,含水率10%和19%时单轴抗压强度最低.由此可知,炉渣的抗压强度随着含水率的增加表现为先增加后减小的趋势,含水率约15%时达到最大.绘制不同龄期干密度 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时的单轴抗压强度随含水率的变化曲线见图6,其变化规律与之相似,由此可知含水率对炉渣的抗压强度影响较大,最佳含水率附近强度较大.

综上所述,炉渣的超声波波速、主应力差峰值及单轴抗压强度随含水率的变化趋势基本一致.炉渣随含水率变化的根本力学机制可概括如下:含水率很低时,炉渣颗粒间基本无粘聚力,含水率小于最优含水率(15.5%)范围内,随着含水率的增加,炉渣试样的密度也随之增加,此外炉渣颗粒间由于水的吸附作用,使炉渣颗粒的黏聚力逐渐增加,抗剪强度也随之增加;含水率达到炉渣最优含水率后,炉渣颗粒

间的结膜水厚度增大,基质吸力随之减小,孔隙水压力使有效应力减小,其粘聚力和内摩擦角也随之减小,导致其抗剪强度下降。

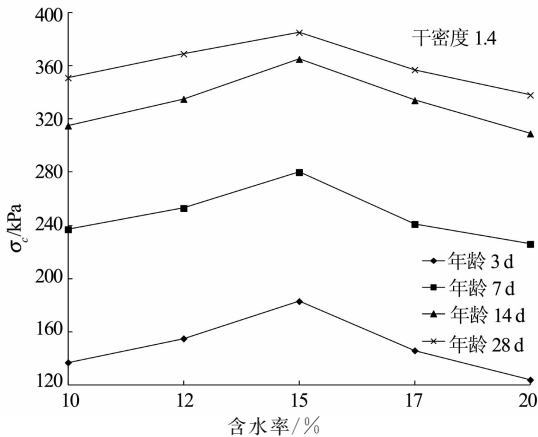


图 6 干密度 1.4 炉渣的单轴抗压强度
Fig. 6 The uniaxial compressive strength of MSWI bottom ash with dry density 1.4

4 波速、粘聚力和单轴抗压强度关系

材料的泊松比、内摩擦角及粘聚力等参数,在一定程度上能反映岩土体的力学与强度特性^[20]。炉渣的材料特性,主要由应力水平、粘聚力和摩擦角决定。炉渣的泊松比可以由纵、横波波速比值确定,基于弹性理论^[21], V_p/V_s 的定义公式为:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量, ρ 为材料的密度, ν 为泊松比。两式相除得

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (3)$$

由式(3)可知波速比和泊松比有关,以不同龄期干密度 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的炉渣为例,采用超声波检测分析仪进行超声波横波及纵波波速测定,采用上述方法计算不同含水率的炉渣泊松比见表 3。由表 3 可知随着龄期的增加,泊松比随之减小,龄期相同时,泊松比随着含水率的增加表现为先减小后增加的趋势。值得注意的是,炉渣的泊松比变化幅度较小,这主要是由于材料的超声波纵波及横波波速变化趋势相同^[19]。含水率 10%~20% 范围内,炉渣的纵波波速增加横波波速也随之增加,反之则同时下降,导致其纵横波波速的比值整体上在较小范围内变动,也即在最优含水率附近范围内,非饱和炉渣的强度在一定范围内变化,这是其泊松比在较小范围内变化的主要原因。

表 3 炉渣试样泊松比

Tab. 3 The Poisson's ratio values of the slag samples

$w/\%$	泊松比			
	龄期 3 d	龄期 7 d	龄期 14 d	龄期 28 d
10	0.292	0.287	0.283	0.281
12	0.291	0.285	0.281	0.279
15	0.289	0.284	0.279	0.277
17	0.292	0.286	0.82	0.281
19	0.294	0.288	0.285	0.283

根据有粘聚力材料泊松比与内摩擦角的剪破坏之间的关系^[20],泊松比(ν)与粘聚力(c)、及单轴抗压强度(σ_c)有关。为研究垃圾炉渣的 3 个强度指标间的关系,采用饱和和三轴固结排水试验和无侧限抗压强度试验分别测得炉渣不同含水率的 c 和 σ_c 。以干密度 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的炉渣为例,其 c 和 σ_c 的拟合关系见图 7,拟合关系式为:

$$c = 0.281\sigma_c + 1.95 \quad (4)$$

式中:直线斜率的拟合值为 0.281,与表 3 的结果吻合,由此可知炉渣的强度指标的关系式:

$$c = \nu\sigma_c + b \quad (5)$$

式中:直线的斜率为炉渣的泊松比(ν)。由此可知,通过采用超声波可以测定炉渣的泊松比,采用无侧限抗压强度试验和饱和三轴排水试验测定炉渣的单轴抗压强度及粘聚力,可以建立不同含水率条件下炉渣强度指标的关系。

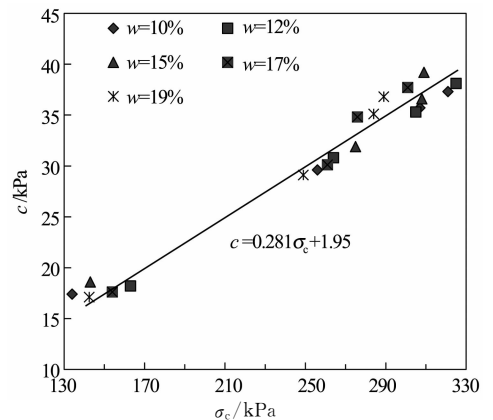


图 7 干密度 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 炉渣 c 与 σ_c 的关系曲线
Fig. 7 The relationship between c and σ_c of dry density $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

5 结论

分析了垃圾炉渣的材料特性,采用超声波试验、饱和和三轴固结排水试验及无侧限抗压强度试验,测定了不同含水率条件下的垃圾炉渣的泊松比、粘聚力及单轴抗压强度,可以得到如下结论:

1) 垃圾炉渣的矿物组成主要为结晶良好的

SiO_2 , 含有少量的 CaCO_3 , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. 最佳含水率约为 15.5%, 最大干密度为 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 属于级配良好砾类土, 可作为道路路基填筑材料使用.

2) 含水率对垃圾炉渣的强度影响较大. 含水率 10%~20% 范围内, 超声波波速表现为先增加后减小的趋势, 无侧限试验表明轴向承载力也表现为先增大后变小, 最佳含水率附近达到峰值, 其中含水率 15%~17% 阶段炉渣的波速及承载力下降较快. 饱和三轴固结排水试验表明: 炉渣的主应力差峰值及粘聚力随初始制样含水率的增加呈先增加后减小趋势. 其力学机制为: 低于最优含水率范围内, 随着含水率的增加, 炉渣的粘聚力随之增加, 造成抗剪强度也随之增加; 达到炉渣最优含水率后, 其粘聚力和内摩擦角也随之减小, 导致其抗剪强度下降.

3) 采用超声波波速测定试验可以测得炉渣的泊松比, 采用饱和固结排水三轴试验测定其粘聚力和内摩擦角, 使用无侧限抗压试验测定其单轴抗压强度. 结合炉渣的泊松比、单轴抗压强度及粘聚力, 建立不同含水率条件下三者的关系, 为研究炉渣的强度特性提供理论基础.

参考文献

- [1] DIJKSTRA J J, SLOOT H A V D, COMANS R N J. Process identification and model development of contaminant transport in MSWI bottom ash [J]. *Waste Management*, 2002, 22(5): 531-541.
- [2] 陈德珍, 耿翠洁, 孙文州, 等. 焚烧炉渣集料用于道路铺筑的节能减排定量[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(1): 71-77.
CHEN Dezhen, GENG Cuijie, SUN Wenzhou, *et al.* Energy saving and pollution alleviation by replacement of crushed rock with municipal solid waste incineration bottom ash for road construction [J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(1): 71-77. (In Chinese)
- [3] 何晶晶, 宋立群, 章骅, 等. 垃圾焚烧炉渣的性质及其利用前景[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(4): 395-398.
HE Pinjing, SONG Liqun, ZHANG Hua, *et al.* Characterization of waste incineration bottom ash and its beneficial use prospect [J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(4): 395-398. (In Chinese)
- [4] 张涛, 赵增增. 城市生活垃圾焚烧炉渣在混凝土中的应用研究[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(4): 65-69.
ZHANG Tao, ZHAO Zengzeng. Reutilization of municipal solid waste incinerator bottom ash as concrete aggregates [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(4): 65-69. (In Chinese)
- [5] 谢燕, 吴笑梅, 樊粤明, 等. 生活垃圾焚烧炉渣用作水泥混合材的研究[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(12): 37-43.
XIE Yan, WU Xiaomei, FAN Yueming, *et al.* Investigation into incineration bottom ash of municipal solid waste used as cement admixture [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science*, 2009, 37(12): 37-43. (In Chinese)
- [6] 石爱娟, 何晶晶, 邵立明, 等. 城市生活垃圾焚烧炉渣工程性质研究[J]. *环境工程*, 2004, 22(1): 47-50.
Shi Aijuan, HE Pinjing, SHAO Liming, *et al.* Engineering characteristics of cinder from municipal domestic refuse incinerator [J]. *Environmental Engineering*, 2004, 22(1): 47-50. (In Chinese)
- [7] 刘栋, 李立寒, 崔华杰. 水泥稳定炉渣碎石基层路用性能[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2015, 43(3): 405-409.
- LIU Dong, LI Lihan, CUI Huajie. Pavement performance of cement stabilized municipal solid waste incineration bottom ash aggregate and crushed stones [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2015, 43(3): 405-409. (In Chinese)
- [8] DIMITRIS D, MENG Xiaoguang. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils [J]. *Engineering Geology*, 2003(70): 377-394.
- [9] CHIMENOS J M, FERNÁNDEZ A I, NADAL R, *et al.* Short-term natural weathering of MSWI bottom ash [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 79(3): 287-299.
- [10] FERRARIS M, SALVO M, VENTRELLA A, *et al.* Use of vitrified MSWI bottom ashes for concrete production [J]. *Waste Management*, 2008, 29(3): 1041-1047.
- [11] SORLINI S, ABBÀ A, COLLIVIGNARELLI C. Recovery of MSWI and soil washing residues as concrete aggregates [J]. *Waste Management*, 2011, 31(2): 289-297.
- [12] HJELMAR O, HOLM J, CRILLESEN K. Utilization 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.
- [13] BECQUART F, BERNARD F, ABRIAK N E, *et al.* Monotonic aspects of the mechanical behaviour of bottom ash from municipal solid waste incineration and its potential use for road construction [J]. *Waste Management*, 2009, 29(4): 1320-1329.
- [14] ZEKOS D, KABALAN M, SYAL S M, *et al.* Geotechnical characterization of a Municipal Solid Waste Incineration Ash from a Michigan monofill [J]. *Waste Management*, 2013, 33(6): 1442-1450.
- [15] SCHREURS J P G M, SLOOT H A V D, HENDRIKS C. Verification of laboratory-field leaching behavior of coal fly ash and MSWI bottom ash as a road base material [J]. *Waste Management*, 2000, 20(2): 193-201.
- [16] 冯兴波, 徐永福. 重复利用的城市垃圾炉渣无侧限抗压强度实验 [J]. *工程地质学报*, 2016, s1: 369-374.
FENG Xingbo, XU Yongfu. Experiment study on unconfined compressive strength of reused municipal solid wastes combustion [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, s1: 369-374. (In Chinese)
- [17] 卢佩霞, 殷成胜, 王会芳. 垃圾炉渣用于路基填筑的土工特性试验分析 [J]. *筑路机械与施工机械化*, 2015, 32(9): 51-54.
LU Peixia, YIN Chengsheng, WANG Hui Fang. Experimental study on characteristics of landfill slag used in subgrade filling [J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2015, 32(9): 51-54. (In Chinese)
- [18] 黄政宇, 纪学灵, 黄靓. 超声波检测混凝土缺陷成像的定性分析法 [J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2008, 35(8): 5-8.
HUANG Zhengyu, JI Xueling, HUANG Liang. Qualitative analytical method of imaging the concrete flaws by ultrasonic test [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2008, 35(8): 5-8. (In Chinese)
- [19] 黄靓, 黄政宇, 汪优. 结构混凝土超声波层析成像的反演算法研究 [J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2006, 33(5): 26-30.
HUANG Liang, HUANG Zhengyu, WANG You. Inversion algorithm study on ultrasonic computerized tomography for structural concrete [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2006, 33(5): 26-30. (In Chinese)
- [20] 张年学, 盛祝平, 李晓, 等. 岩石泊松比与内摩擦角的关系研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S1): 2599-2609.
ZHANG Nianxue, SHENG Zhuping, LI Xiao, *et al.* Study of relationship between Poisson's ratio and angle of internal friction for rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S1): 2599-2609. (In Chinese)
- [21] AMENZADE Y A. Theory of elasticity. [M]. "mir", moscow, 1979.