

DOI: 10.11779/CJGE201503006

新鲜生活垃圾抗剪强度参数变化规律研究

张振营, 严立俊, 吴大志, 章凌峰, 傅 军, 胡渊杰

(浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 在环境土工实验室, 人工配制新鲜生活垃圾试样, 采用大型压缩与直剪联合测定仪器, 对 288 个垃圾试样抗剪强度参数的变化规律进行了研究。将生活垃圾分为 3 大类, 模拟城市经济发展的不发达、发展中及发达 3 个阶段, 将生活垃圾分为 3 大配比。试验采用 3 种初始孔隙比 (2.1, 2.5, 2.9)、4 级竖向压力 (25, 50, 100, 200 kPa), 每级压力作用下的时间分别为 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 6, 12, 24 h, 研究了 10 种剪应变限值 (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%, 18%, 20%) 新鲜垃圾的抗剪强度参数。试验结果表明, 新鲜垃圾的抗剪强度与竖向压力可以拟合为一条直线, 符合库仑定律。随着剪应变限值的增加, 抗剪强度参数 c 值和 φ 值均有增加的趋势, 符合对数模型。给出了不同因素影响下, 新鲜生活垃圾 c 值和 φ 值的取值范围, c 值在 6.14~34.17 kPa 之间、 φ 值在 4.1°~30.6° 之间。

关键词: 新鲜生活垃圾; 大型压缩与直剪联合试验; 剪应变限值; 对数模型; 抗剪强度参数

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)03-0432-08

作者简介: 张振营 (1963 -), 男, 博士, 教授, 主要从事土力学及环境岩土工程教学与科研工作。E-mail: zhangzhenyinga@163.com。

Experimental study on shear strength parameters of fresh municipal solid waste

ZHANG Zhen-ying, YAN Li-jun, WU Da-zhi, ZHANG Ling-feng, FU Jun, HU Yuan-jie

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To investigate the laws of the shear strength parameters of fresh municipal solid waste (MSW), the compression-direct shear combined tests are carried out by using large-scale combined test apparatus of compression and direct shear. Two hundred and eighty-eight fresh MSW testing samples are prepared in geo-environmental laboratory. The components of fresh MSW are divided into three parts, and three mixture proportions are given to simulate the three stages of urban economic development, which are underdeveloped, developing and developed. The initial void ratios of the samples are selected as 2.1, 2.5 and 2.9. Four different vertical pressures, 25, 50, 100 and 200 kPa, are chosen, and the compression time for every vertical load is 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 6, 12 and 24 hours, respectively. The shear strength parameters for ten different shear strain limit values, which are 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%, 18% and 20%, are studied. The test results show that the relationship between the shear strength and the vertical load applied on the test samples is in conformity with the Coulomb's law. Besides, the cohesion force and the internal friction angle of the fresh MSW increase with the increase of the shear strain limit value, and a logarithmic model can be used to describe the relationship. Furthermore, the shear strength parameters of the fresh MSW under various conditions are obtained. It is found that the cohesion force varies from 6.14 to 34.17 kPa, and that the internal friction angle varies from 4.1 to 30.6 degrees.

Key words: fresh municipal solid waste; large-scale compression-direct shear combined test; shear strain limit value; logarithmic model; shear strength parameter

0 引 言

进入 21 世纪以来, 城市化步伐加快, 城市人口迅速增加, 城市生活垃圾的产量以惊人的速度增长, 尤其是以人口大国著称的中国来说尤为明显。由于垃圾填埋场选址的复杂性和困难性, 许多城市需要对原有的垃圾填埋场进行扩建, 填埋高度进一步增大, 这对垃圾填埋场的稳定性提出了更高的要求, 垃圾的抗剪

强度参数是垃圾填埋场稳定性研究的基础, 需要考虑各种复杂因素进行深入而细致的研究。李小勇等^[1]通

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178432, 50878197, 51478436); 浙江省自然科学基金项目 (LY14E080021); 浙江理工大学研究生创新研究项目 (YCX13031); 浙江省大学生创新活动计划暨新苗人才计划项目 (2013R406038)

收稿日期: 2014-06-18

过室内直剪试验,进行了北京生活垃圾土性参数的概率分布分析,得出不排水条件下黏聚力为 1.3~15.3 kPa、内摩擦角为 12.5°~35.2°。张季如等^[2]取不同深度试样的强度值进行线性拟合,得到黏聚力变化范围为 0~29 kPa、内摩擦角为 24.4°。冯世进等^[3]进行了三轴试验,得出黏聚力为 0~50 kPa、内摩擦角为 17°~26°。旦增顿珠等^[4]总结了国外资料,得出黏聚力为 0~67 kPa、内摩擦角为 0°~43°;采用单剪试验得到的黏聚力为 21~55 kPa、内摩擦角为 24°~38°。王伟等^[5]对龄期分别为 1, 4, 7 d 的 MSW 进行了单剪试验,得到黏聚力为 6.5~14.3 kPa、内摩擦角为 22.2°~29.9°。陈云敏等^[6-7]认为,由于垃圾土的应变硬化特性,垃圾的抗剪强度参数值随破坏应变水平增加而增加,对于给定的应变水平,垃圾的黏聚力随埋龄期的增加而降低,而摩擦角随埋龄期增加而增加。张文杰等^[8]对苏州七子山填埋场的垃圾进行试验,得出有效黏聚力为 0~24 kPa、有效内摩擦角为 8.4°~29.5°。施建勇等^[9]研究了位于垃圾填埋场斜坡上衬垫结构在垂直应力作用下沿斜坡滑移的剪切特性,采用单剪试验,得出土工网-光面膜界面的强度参数取 $c=0.0$ kPa, $\varphi=11^\circ\sim 13^\circ$ 能够保证工程安全;复合排水网-光面膜界面的强度参数取 $c=0.0$ kPa, $\varphi=13^\circ\sim 15^\circ$ 是可行的。Richardson 等^[10]、Houston 等^[11]、Withiam 等^[12]、Kavazanjian 等^[13]、Landva 等^[14]通过现场取样,采用大型直剪试验对完整的和重组的垃圾进行低应力下的试验,也得到相应的黏聚力和内摩擦角的取值。Pelkey 等^[15]采用大型直剪试验对新鲜垃圾进行强度参数测定,认为随着竖向压力的增加,其摩擦角减小;通过试验得到黏聚力为 0~28 kPa、内摩擦角为 15°~37°。Machado 等^[16]采用三轴试验,分析了剪应变分别为 5%, 10%, 20% 的强度性质,得到黏聚力为 0.5~70 kPa、内摩擦角为 14°~27.4°。Bray 等^[17]采用大型直剪试验对 MSW 进行了抗剪强度分析,得出内摩擦角随着竖向压力的增加而减小,且减小的规律与竖向压力的对数呈直线关系。本文在总结上述研究成果的基础上,将生活垃圾分为 3 大类,模拟城市经济发展的不发达、发展中及发达 3 个阶段,将生活垃圾分为 3 大配比,分别考虑不同初始孔隙比、不同压力、不同压力作用的不同压缩时间、不同剪应变限值对抗剪强度参数的影响,对 288 个新鲜生活垃圾试样进行了大型压缩与直剪联合测定试验,深入而系统地研究了新鲜生活垃圾的抗剪强度参数及其变化规律。

1 试验仪器及材料

实验采用大型固废压缩-直剪联合测定仪进行试

验,试验仪器见图 1。试验容器的内直径为 180 mm,容器上下盒高度为 150 mm,水平剪切位移量程为 0~45 mm。该仪器由竖向压力系统、竖向压缩测试系统、水平剪力系统及水平位移量测系统 4 部分组成,其中水平剪力及水平位移数据可以自动采集。本试验参照杭州天子岭固体废弃物填埋场垃圾的主要成分,人工配制试样(考虑尺寸效应,所有材料的尺寸均小于仪器尺寸的 1/6),将垃圾材料分为易降解材料、难降解材料及不可压缩的固体材料 3 大类,模拟城市经济发展的不发达、发展中及发达 3 个阶段,将生活垃圾分为 3 大配比(见表 1),每种配比下 3 大类材料的湿质量比见表 2,新鲜生活垃圾的成分见图 2。



图 1 固体废弃物压缩-直剪联合测定仪

Fig. 1 Combined test apparatus of compression and direct shear for MSW

表 1 新鲜 MSW 的配比

序号	易降解材料含量/%	难降解材料含量/%	不可压缩的固体材料含量/%	初始孔隙比 e_0	含水率/%	比重
配比 1	50	15	35	2.1, 2.5, 2.9	60	2.10
配比 2	65	10	25	2.1, 2.5, 2.9	134	2.05
配比 3	80	5	15	2.1, 2.5, 2.9	207	2.00

2 试验过程

试验按土工试验规程^[18]进行压缩与直剪联合试验。将配好的新鲜垃圾搅拌均匀,倒入试验容器内,采用分层压实的方法,直到垃圾全部填满容器且被压实为止,随后放置透水石和加压板,将百分表对准加压板的中心,调整百分表并记录初始读数。为了便于说明,以竖向荷载 25 kPa 为例,首先施加荷载 25 kPa,先做瞬时剪切试验,施加荷载后立刻按下剪切按钮进行试验,并记录剪应力和剪切位移,直到 MSW 试样破坏为止(要求剪应变超过 20%,默认为剪切面积不变,即不需要对剪切面积进行修正)。剪坏后,重新安

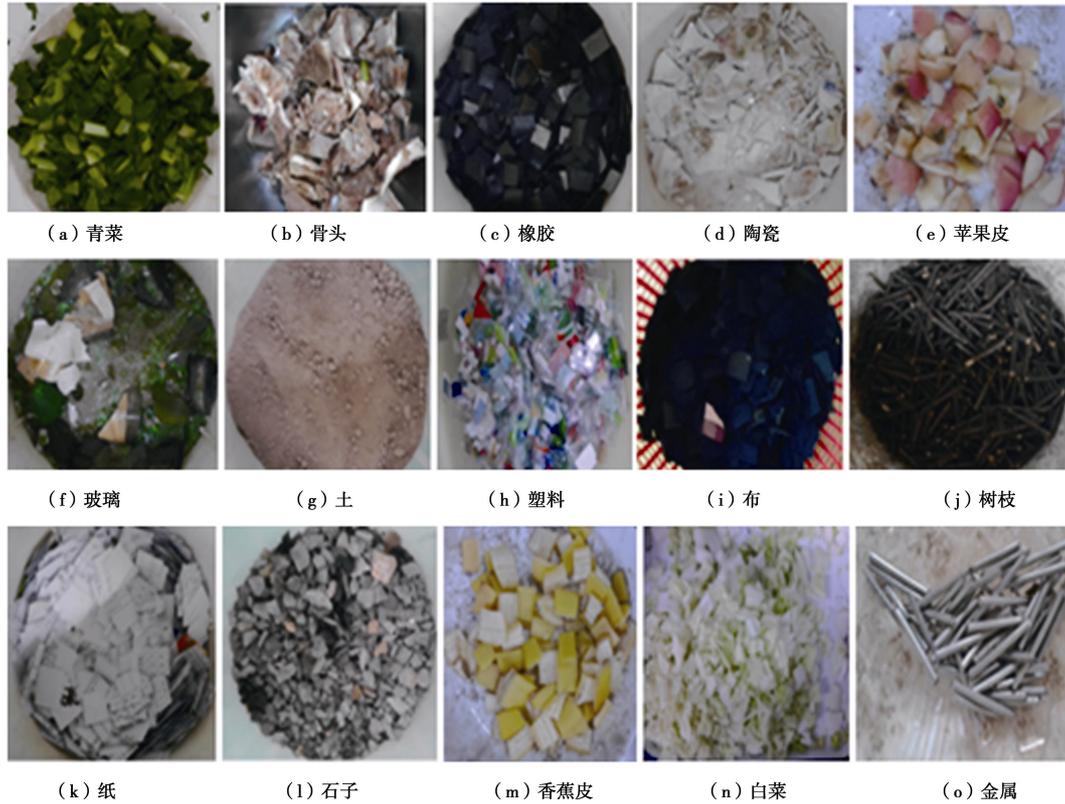


图 2 新鲜 MSW 的成分

Fig. 2 Composition of fresh MSW

表 2 新鲜 MSW 的成分比例 (湿重)

Table 2 Percentage composition of fresh MSW (wet weight)

名称	易降解材料/%				难降解材料/%				不可压缩的固体材料/%			
	废纸	蔬菜	果皮	木、草、树叶	纺织品	肉骨	塑料	橡胶	金属	砖、石、土	陶瓷	玻璃
配比1	2.0	36.0	9.0	3.0	4.5	4.5	3.0	3.0	1.75	29.75	1.75	1.75
配比2	2.6	46.8	11.7	3.9	3.0	3.0	2.0	2.0	1.25	21.25	1.25	1.25
配比3	3.2	57.6	14.4	4.8	1.5	1.5	1.0	1.0	0.75	12.75	0.75	0.75

表 3 MSW 的抗剪强度参数 ($e_0=2.1$)

Table 3 Shear strength parameters of MSW ($e_0=2.1$)

压缩时间/h	0	0.25	0.5	1	2	6	12	24
c/kPa	11.81	9.49	16.31	22.96	17.54	14.08	22.94	22.44
$\varphi /(^{\circ})$	25.9	24.8	26.5	25.9	30.1	28.1	24.5	30.6
R	0.999	0.993	0.992	0.962	0.972	0.991	0.947	0.972

装相同的试样, 施加荷载 25 kPa, 压缩 0.25 h, 然后进行剪切试验, 直到试样破坏为止 (要求剪应变超过 20%)。剪坏后, 按同样的方法依次分别安装相同的试样, 施加荷载 25 kPa, 压缩时间依次分别为 0.5, 1, 2, 6, 12, 24 h, 然后依次分别进行剪切试验, 直到试样破坏为止 (要求剪应变超过 20%)。然后再分别安装相同的垃圾试样, 分别施加荷载 50, 100, 200 kPa, 压缩时间分别为 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 6, 12, 24 h,

按同样的方法重复上述试验步骤, 记录全部的试验数据 (表 3)。详细试验步骤参考文献[19]。

3 试验结果及分析

实验采用3种不同的初始孔隙比 ($e_0=2.1, 2.5, 2.9$), 4级竖向压力 (25, 50, 100, 200 kPa), 每级压力作用下的压缩时间分别为0, 0.25, 0.5, 1, 2, 6, 12, 24 h, 进行了288个试样的压缩与直剪联合测定试

验。典型剪应力与剪应变的关系见图3, 典型的抗剪强度与竖向压力的关系见图4 (取配比1, 初始孔隙比为2.1, 竖向压力为200 kPa, 剪应变为20%时的剪应力为抗剪强度)。图4可以看出, 不同压缩时间下的抗剪强度与竖向压力可以拟合为一条直线, 符合库仑定律。其抗剪强度参数值和拟合系数见表3。黏聚力 c 值范围在9.49~22.96 kPa之间, 内摩擦角 φ 值范围在24.5°~30.6°之间, 拟合系数 R 在0.947~0.999之间。

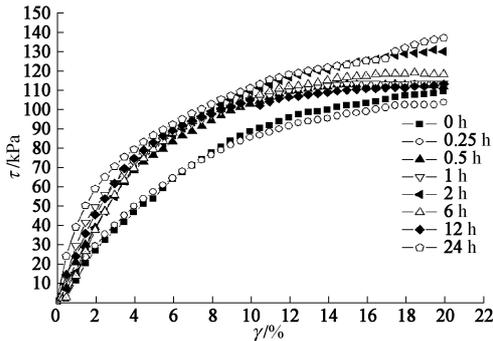


图3 不同压缩时间 MSW 的 $\tau - \gamma$ 曲线

Fig. 3 Curves of $\tau - \gamma$ for different compression time

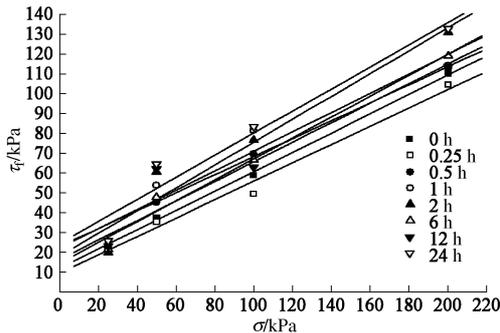


图4 不同压缩时间 MSW 的抗剪强度包线

Fig. 4 Shear strength envelop curves of MSW for different compression time

由于填埋场的垃圾是分层逐渐堆高的, 垃圾填埋过程中, 随着新鲜垃圾的逐渐堆高, 垃圾填埋体出现压缩变形并伴随滑移失稳的趋势。模拟填埋场堆体的渐进失稳破坏模式, 即模拟垃圾填埋场中垃圾之间及防渗层与垃圾之间的相对位移, 取垃圾的剪应变限值分别为2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%,

18%, 20%, 则其对应的剪应力即为不同剪应变限值的抗剪强度。不同剪应变限值的抗剪强度与竖向压力的典型关系见图5~7 (取配比1, 压缩24 h所测得数据)。图5~7可以看出, 不同剪应变限值 MSW 的抗剪强度与竖向压力的关系均可拟合为直线形式, 符合库仑定律。抗剪强度参数与拟合系数见表4~6。表4~6可以看出, 对于相同的初始孔隙比, 随着剪应变的增加, c , φ 值均呈增加的规律, 且增加的趋势逐渐变缓。表4可知, 初始孔隙比为2.1 MSW 的 c 值范围在7.64~22.44 kPa之间、 φ 值范围在14.6°~30.6°之间、拟合系数在0.972~0.999之间。表5可知, 初始孔隙比为2.5 MSW 的 c 值范围在12.65~28.19 kPa之间、 φ 值范围在10.9°~26.2°之间、拟合系数在0.991~0.999之间。表6可知, 初始孔隙比为2.9 MSW

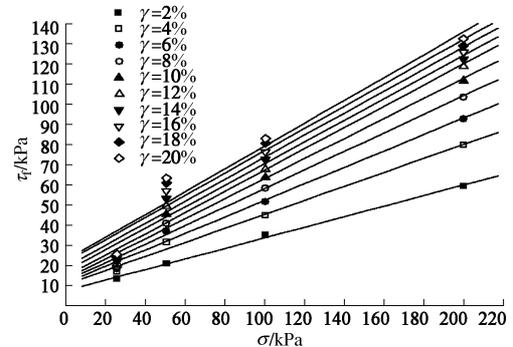


图5 不同剪应变限值 MSW 的抗剪强度包线 ($e_0=2.1$)

Fig. 5 Shear strength envelop curves of MSW for different shear strain limit values with $e_0=2.1$

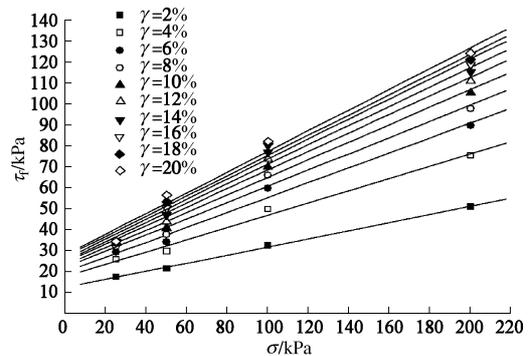


图6 不同剪应变限值 MSW 的抗剪强度包线 ($e_0=2.5$)

Fig. 6 Shear strength envelop curves of MSW for different shear strain limit values with $e_0=2.5$

表4 不同剪应变限值 MSW 的抗剪强度参数 ($e_0=2.1$)

Table 4 Shear strength parameters of MSW for different shear strain limit values ($e_0=2.1$)

$\gamma/\%$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
c/kPa	7.64	10.79	11.65	12.47	13.69	14.94	17.3	19.43	22.01	22.44
$\varphi / (^\circ)$	14.6	19.1	22.2	24.6	26.4	27.7	28.1	28.6	28.8	30.6
R	0.999	0.996	0.993	0.993	0.991	0.988	0.985	0.980	0.974	0.972

表 5 不同剪应变限值 MSW 的抗剪强度参数 ($e_0=2.5$)

Table 5 Shear strength parameters of MSW for different shear strain limit values ($e_0=2.5$)

$\gamma/\%$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
c/kPa	12.65	17.97	20.02	22.24	23.28	24.45	25.32	26.19	27.38	28.19
$\varphi /(^{\circ})$	10.9	16.3	19.5	21.1	22.7	23.8	24.7	25.5	25.7	26.2
R	0.999	0.995	0.993	0.992	0.994	0.995	0.994	0.992	0.992	0.991

表 6 不同剪应变限值 MSW 的抗剪强度参数 ($e_0=2.9$)

Table 6 Shear strength parameters of MSW for different shear strain limit values ($e_0=2.9$)

$\gamma/\%$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
c/kPa	11.73	13.45	14.48	15.4	16.14	17.36	18.00	18.63	20.00	22.50
$\varphi /(^{\circ})$	13.0	18.6	21.7	23.5	25.1	26.1	27.1	27.5	27.3	26.9
R	0.966	0.981	0.988	0.991	0.995	0.998	0.999	0.999	0.997	0.997

的 c 值范围在 11.73~22.50 kPa 之间, φ 值范围在 $13.0^{\circ} \sim 27.5^{\circ}$ 之间、拟合系数在 0.966~0.999 之间。图 5~7 还可看出, 较小初始孔隙比 (2.1, 2.5)、较低竖向压力 (25 kPa) 时, 不同剪应变限值试验测得的抗剪强度偏小, 原因可能是由于初始孔隙比越小, 新鲜生活垃圾的结构越密实, 在低竖向压力条件下, 组分中的难降解成分和大部分易降解成分都难以重新被压实。随着压力的增大, 破坏了垃圾材料之间的初始结构平衡状态, 垃圾材料重新排列定位, 难降解和大部分易降解成分被重新压实, 抗剪强度逐渐恢复。

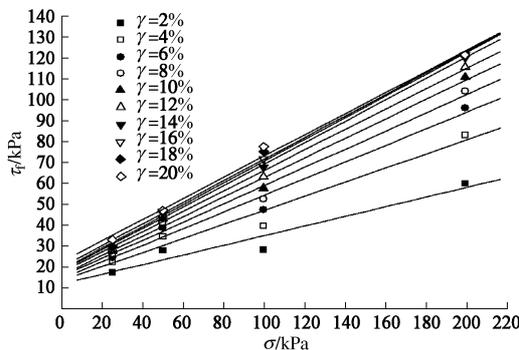


图 7 不同剪应变限值 MSW 的抗剪强度包线 ($e_0=2.9$)

Fig. 7 Shear strength envelop curves of MSW for different shear strain limit values with $e_0=2.9$

不同配比, 不同初始孔隙比的抗剪强度参数与剪应变限值的关系见图 8~19。图 8, 10 及图 12 可以看出, 在相同配比、相同初始孔隙比下, 新鲜生活垃圾的 φ 值随着剪应变限值的增加, 呈现出增加的趋势, 且趋势逐渐变缓, 当剪应变达到 20% 时, 部分试样的 φ 值趋于不变甚至略微有减小的趋势。以压缩 24 h 为例, 分别对 3 种配比、3 种初始孔隙比 MSW 的试验点进行拟合, 得到图中实线, 其规律符合对数模型。分别将图 8、图 10 及图 12 中的横坐标转换成对数坐标, 得到图 9、图 11 及图 13。图 9, 11 及图 13 可以看出, 其规律可拟合为直线形式, 拟合系数均大于 0.95, 直线方程为

$$\varphi = A \lg \gamma + B \quad (1)$$

式中, A, B 为与配比、初始孔隙比及压缩时间等因素有关的参数。

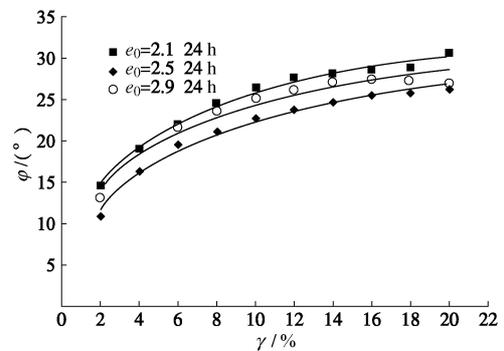


图 8 MSW 的 $\varphi - \gamma$ 曲线 (配比 1)

Fig. 8 Curves of $\varphi - \gamma$ for first kind of mixture proportion

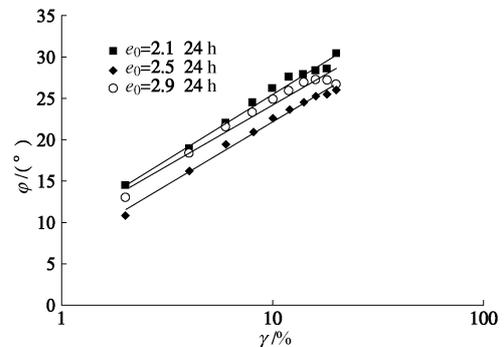


图 9 MSW 的 $\varphi - \gamma$ 曲线 (配比 1)

Fig. 9 Curves of $\varphi - \gamma$ for first kind of mixture proportion

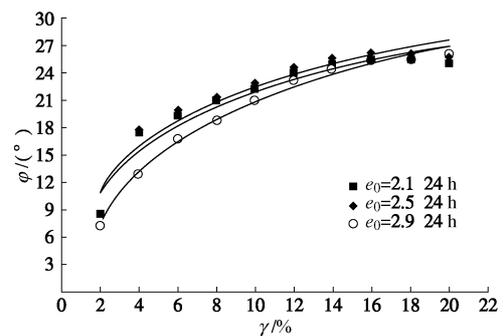


图 10 MSW 的 $\varphi - \gamma$ 曲线 (配比 2)

Fig. 10 Curves of $\varphi - \gamma$ for second kind of mixture proportion

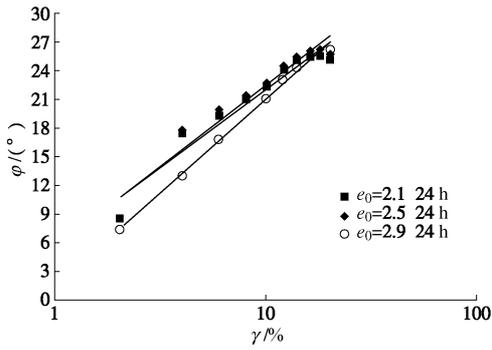


图 11 MSW 的 $\varphi - \gamma$ 曲线 (配比 2)

Fig. 11 Curves of $\varphi - \gamma$ for second kind of mixture proportion

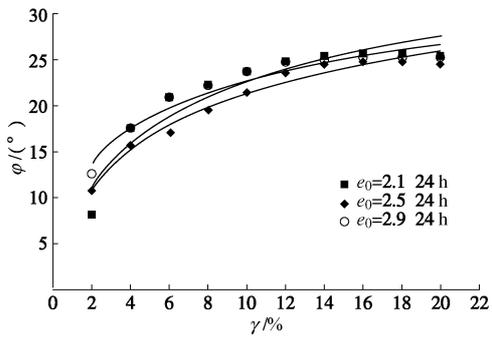


图 12 MSW 的 $\varphi - \gamma$ 曲线 (配比 3)

Fig. 12 Curves of $\varphi - \gamma$ for third kind of mixture proportion

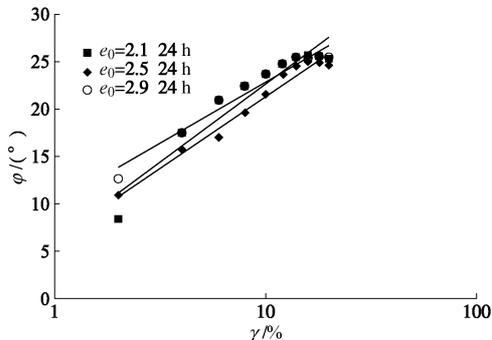


图 13 MSW 的 $\varphi - \gamma$ 曲线 (配比 3)

Fig. 13 Curves of $\varphi - \gamma$ for third kind of mixture proportion

图14, 16及图18可以看出, 对于相同配比、相同初始孔隙比, 新鲜生活垃圾的 c 值随着剪应变限值的增加, 试验点虽然具有一定的离散性, 但总体呈现出增加的趋势, 对于大部分试样来说, 其 c 值增加的趋势也符合对数模型。为了便于说明, 分别以图14中3种初始孔隙比下的压缩时间为12 h的曲线、图16中3种初始孔隙比下的压缩时间为0 h的曲线、图18中3种初始孔隙比下的压缩时间为0 h的曲线为例, 对试验点进行拟合, 得到图中实线, 其规律符合对数模型。分别将图14, 16及图18中的横坐标转换为对数坐标, 得到图15, 17及图19。图15, 17及图19可以看出, 其规律可拟合为直线形式, 拟合系数均大于0.9, 直线方程为

$$c = D \lg \gamma + E \quad (2)$$

式中, D, E 为与配比、初始孔隙比及压缩时间等因素有关的参数。

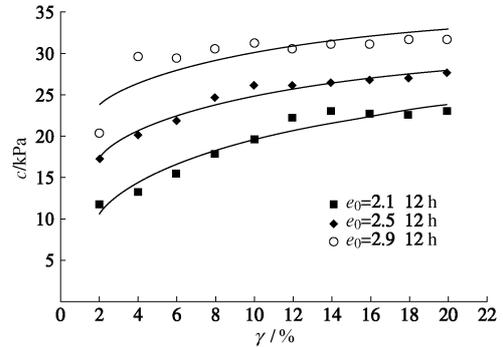


图 14 MSW 的 $c - \gamma$ 曲线 (配比 1)

Fig. 14 Curves of $c - \gamma$ for first kind of mixture proportion

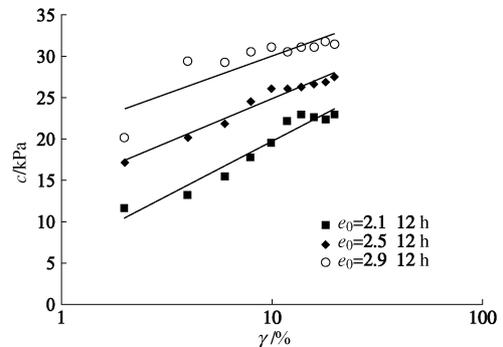


图 15 MSW 的 $c - \gamma$ 曲线 (配比 1)

Fig. 15 Curves of $c - \gamma$ for first kind of mixture proportion

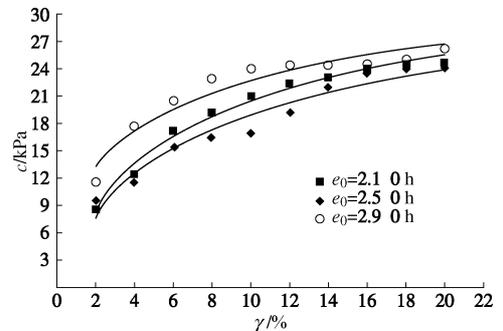


图 16 MSW 的 $c - \gamma$ 曲线 (配比 2)

Fig. 16 Curves of $c - \gamma$ for second kind of mixture proportion

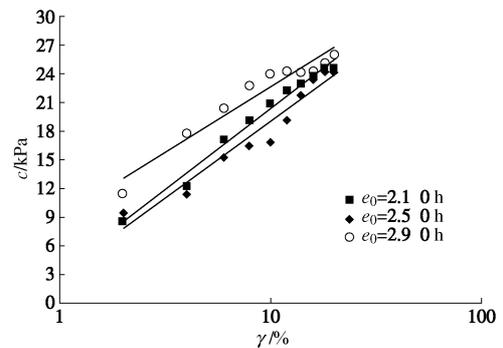
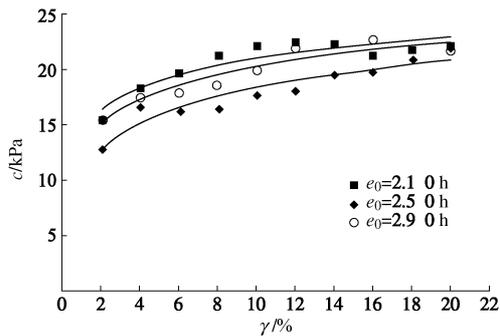
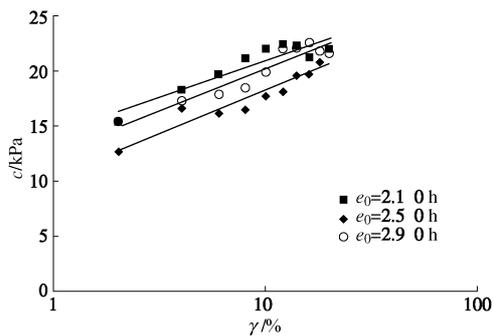


图 17 MSW 的 $c - \gamma$ 曲线 (配比 2)

Fig. 17 Curves of $c - \gamma$ for second kind of mixture proportion

图 18 MSW 的 $c - \gamma$ 曲线 (配比 3)Fig. 18 Curves of $c - \gamma$ for third kind of mixture proportion图 19 MSW 的 $c - \gamma$ 曲线 (配比 3)Fig. 19 Curves of $c - \gamma$ for third kind of mixture proportion

综合图 8~19 可以得到, 本次试验配比 1 新鲜垃圾的 c 值在 6.14~34.17 kPa 之间, φ 值在 $5^\circ \sim 30.62^\circ$ 之间; 配比 2 新鲜垃圾的 c 值在 8.15~31.22 kPa 之间, φ 值在 $6.4^\circ \sim 26.4^\circ$ 之间; 配比 3 新鲜垃圾的 c 值在 6.66~30.5 kPa 之间, φ 值在 $4.1^\circ \sim 25.6^\circ$ 之间。

4 结 论

对新鲜生活垃圾进行了合理的分类, 采用大型压缩与直剪联合测定试验仪器, 考虑不同配比、不同初始孔隙比、不同压力、不同压缩时间及不同剪应变限值等因素的影响, 系统地对新鲜生活垃圾的抗剪强度参数进行了研究, 结论如下:

(1) 不同压缩时间及不同剪应变限值下新鲜生活垃圾的抗剪强度与竖向压力的关系可以拟合为一条直线, 符合库仑定律。

(2) 在相同初始孔隙比下, 随着剪应变限值的增加, φ 值呈现出增加的趋势, 且增加的趋势逐渐变缓, 当剪应变限值达到 20% 时, 部分垃圾试样的参数值出现减小的趋势, 其规律符合对数模型; 对于黏聚力 c 值, 虽然部分试验点表现出一定的离散性, 但大多数试验点表现出随剪应变限值的增加而呈现增加的趋势, 增加的趋势逐渐变缓, 其规律也可近似拟合为对数关系。

(3) 给出了 φ 值, c 值与 $\lg \gamma$ 的关系式。应用该

表达式, 可以根据实际工程允许的最大剪应变限值, 预测新鲜生活垃圾的抗剪强度参数。

(4) 得到了不同配比、不同初始孔隙比、不同压缩时间、不同剪应变限值的 c , φ 值, 本次试验试样的 c 值在 6.14~34.17 kPa 之间, φ 值在 $4.1^\circ \sim 30.6^\circ$ 之间。

(5) 本文所研究的为新鲜生活垃圾试样, 未考虑温度和降解等因素的影响, 关于降解垃圾的抗剪强度参数的变化规律将另行撰文研究。

参考文献:

- [1] 李小勇, 徐瑞军. 北京生活垃圾土性参数概率特征研究 [C]// 第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 177 - 180. (LI Xiao-yong, XU Rui-jun. Statistical research on earthy characteristics of Beijing's life wastes [C]// The 1st Chinese Symposium on Geoenvironment and Geosynthetics. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002: 177 - 180. (in Chinese))
- [2] 张季如, 陈超敏. 城市生活垃圾抗剪强度参数的测试与分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 110 - 114. (ZHANG Ji-ru, CHEN Chao-min. Measurement and analysis on shear strength parameters of municipal solid waste [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 110 - 114. (in Chinese))
- [3] 冯世进, 周子范, 陈云敏, 等. 城市固体废弃物剪切强度参数的研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2005, 39(7): 987 - 991. (FENG Shi-jin, ZHOU Zi-fan, CHEN Yun-min, et al. Study on shear strength parameters of municipal solid waste [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(7): 987 - 991. (in Chinese))
- [4] 旦增顿珠, 介玉新, 魏戈峰, 等. 垃圾土的强度特性试验研究 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2006, 46(9): 1538 - 1541. (DANZENG Dun-zhu, JIE Yu-xin, WEI Yi-feng, et al. Strength characteristics of municipal solid waste [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science), 2006, 46(9): 1538 - 1541. (in Chinese))
- [5] 王伟, 金鹏, 张芳. 短龄期城市固体垃圾直剪试验及应力位移模型 [J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 166 - 170. (WANG Wei, JIN Peng, ZHANG Fang. Direct shear test of short-fill-age municipal solid wastes and its shear stress-deformation model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 166 - 170. (in Chinese))
- [6] 陈云敏, 林伟岸, 詹良通, 等. 城市生活垃圾抗剪强度与填埋龄期关系的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(3):

- 111 - 117. (CHEN Yun-min, LIN Wei-an, ZHAN Liang-tong, et al. A study on the relationship between the shear strength of municipal solid waste and the fill age[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, **42**(3): 111 - 117. (in Chinese))
- [7] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(1): 1 - 46. (CHEN Yun-min. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(1): 1 - 46. (in Chinese))
- [8] 张文杰, 邱清文, 邱战洪. 垃圾填埋场边坡稳定可靠度分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(增刊 1): 2958 - 2963. (ZHANG Wen-jie, QIU Qing-wen, QIU Zhan-hong. Reliability analysis of stability of a municipal solid waste landfill[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(S1): 2958 - 2963. (in Chinese))
- [9] 施建勇, 钱学德, 朱保坤. 多层复合衬垫界面非线性强度特性的斜面单剪试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2013, **41**(4): 315 - 320. (SHI Jian-yong, QIAN Xue-de, ZHU Bao-kun. Inclined ring simple shear test for nonlinear interface strength behavior in multi-layer composite liner[J]. *Journal of Hohai University(Natural Science)*, 2013, **41**(4): 315 - 320. (in Chinese))
- [10] RICHARDSON G, REYNOLDS D. Geosynthetic considerations in a landfill on compressible clays[C]// *Proceedings of Geosynthetics 91*. Atlanta, GA, 1991: 507 - 516.
- [11] HOUSTON W N, HOUSTON S L, LIU J W, et al. In-situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills[C]// *Proceedings of Specialty Conference on Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills*. New York, ASCE, 1995: 73 - 82.
- [12] WITHIAM J L, TARVIN P A, BUSHELL T D, et al. Prediction and performance of municipal landfill slope[C]// *Geoenvironment 2000, Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics*. New Orleans, Louisiana. ASCE, 1995: 1005 - 1019.
- [13] KAVAZANJIAN E, MATASOVI N, BACHUS R C. Large-diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste[C]// *Proceedings of 7th International Waste Management and Landfill Symposium*. Sardinia, 1999: 437 - 444.
- [14] LANDVA A O, VALSANGKAR A J, PELKEY S G. Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, **37**(6): 1157 - 1165.
- [15] PELKEY S A, VALSANGKAR A J, LANDVA A. Shear displacement dependent strength of municipal solid waste and its major constituent[J]. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 2001, **24**(4): 381 - 390.
- [16] MACHADO S L, CARVALLHO F M, VILAR O M. Constitutive model for municipal solid waste[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, **128**(11): 940 - 951.
- [17] BRAY J D, ZEKKOS D, KAVAZANJIAN JR E, et al. Shear strength of municipal solid waste[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(6): 709 - 722.
- [18] SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [19] 张振营, 严立俊, 吴大志. 新鲜生活垃圾压缩与直剪联合测定试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(11): 3049 - 3055. (ZHANG Zhen-ying, YAN Li-jun, WU Da-zhi. Experimental study on the compression-direct shear combined test of fresh municipal solid waste[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(11): 3049 - 3055. (in Chinese))