

DOI: 10.11779/CJGE201907020

MBT 垃圾的三轴试验结果

张振营, 郭文强, 张宇翔, 吴大志, 徐 辉, 刘开富, 陈 萍

(浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 采集杭州天子岭垃圾填埋场的 MBT 垃圾, 在环境土工实验室进行了成分分析、试样制备、三轴快剪、固结快剪和慢剪试验, 对 MBT 垃圾的剪切强度特性进行了系统地研究。结果表明: ①MBT 垃圾的组分主要以塑料、纺织物、玻璃、灰土和无法识别的材料为主。②随着轴向应变的增大, 偏应力逐渐增大, 轴向应变超过 30%后仍没达到峰值, 是一条应变硬化曲线。③得到了三轴快剪、固结快剪和慢剪试验条件下抗剪强度参数(黏聚力和内摩擦角)的取值范围。④MBT 垃圾的抗剪强度参数与轴向应变的关系可拟合为直线关系, 建立了抗剪强度参数与轴向应变的线性关系表达式。⑤MBT 垃圾的应力 - 应变关系符合邓肯-张模型, 得到了模型参数 a , b 的取值范围, 建立了模型参数 a , b 与围压的幂函数关系表达式。研究结果可为 MBT 垃圾填埋场的稳定性分析提供理论基础。

关键词: MBT 垃圾; 三轴试验; 应变硬化; 抗剪强度参数; Duncan-Chang 模型; 模型参数

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)07-1345-09

作者简介: 张振营(1963—), 男, 教授, 主要从事环境岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: zhangzhenyinga@163.com。

Shear strength behavior of mechanically-biologically treated waste in triaxial tests

ZHANG Zhen-ying, GUO Wen-qiang, ZHANG Yu-xiang, WU Da-zhi, XU Hui, LIU Kai-fu, CHEN Ping

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

Abstract: To study the shear behavior of mechanically biologically treated (MBT) waste systematically, the samples from Tianziling landfill (Hangzhou, China) are collected, and several tests are carried out in an environmental and geotechnical laboratory, such as composition analysis, sample preparation, triaxial unconsolidated-undrained (UU), consolidated-undrained (CU), and consolidated-drained (CD) tests. These tests reveal that the main components of the MBT waste include plastics, textiles, glass, fines, and unidentified materials. The deviatoric stress gradually increases with the increasing axial strain, and no peak value is attained even when the axial strain exceeds 30%, indicating a strain hardening behavior. The UU, CU, and CD tests reveal the ranges of the shear strength parameters (cohesion force and internal friction angle). The relationship between shear strength parameters and axial strain is linear, and the fitting equations are obtained. The stress-strain relationship of the MBT waste conforms to that of the Duncan-Chang model, and the ranges of the model parameters (a and b) are obtained. Further, a power function relationship is established between the model parameters and the confining pressure. These results can provide a theoretical basis for the stability analyses of MBT waste landfills.

Key words: MBT waste; triaxial test; strain hardening; shear strength parameter; Duncan-Chang model; model parameter

0 引言

随着中国经济的快速发展, 城市化水平的不断提高, 越来越多的人口涌向城市, 由此产生的生活垃圾总量逐年增长。数据表明, 中国城市生活垃圾的年增长率与 GDP 增长速率基本保持一致, 多数城市已经面临或即将面临垃圾围城的困境^[1-4]。为了使城市生活垃圾得到最大限度的减量, 杭州率先引进了国外先进的城市生活垃圾处理技术——机械生物处理技术(mechanical-biological treatment, MBT), 并结合自身特点自主创新研发了 EMBT 处理技术, 通过该技术的处理, 城市生活垃圾减量化程度得到大大提高^[5-6]。

虽然城市生活垃圾得到了减量, 但通过减量处理后的最终产物——MBT 垃圾仍然需要填埋处理^[7-8]。由于国内还没有开展 MBT 垃圾剪切强度特性相关研究, 也没有 MBT 垃圾填埋场的设计规范和标准, 在垃圾填埋高度不断增加的情况下, MBT 垃圾填埋场有可能发生滑坡、失稳、渗滤液外泄等灾难性的后果^[9-10]。为了给 MBT 垃圾填埋场的设计、建设及管理提供合理的建议及指导, 防控垃圾填埋场坍塌破坏事故的发

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478436, 51678532)

收稿日期: 2018-07-02

生, 对 MBT 垃圾剪切强度特性的研究至关重要。

Kölsch^[11-13]对粒径范围为 0~20 mm 的 MBT 垃圾进行了大型直剪试验, 得到黏聚力和内摩擦角范围分别为 55~67 kPa 和 31.8° ~36.1°, 认为在大变形条件下的强度特性类似于加筋土的强度特性, 总抗剪强度由剪切面上的摩擦力和纤维中的拉力组成。Powrie 等^[14]对粒径范围为 0~20 mm 的 MBT 垃圾进行了大型直剪试验, 假设黏聚力为零的条件下得到了内摩擦角的范围为 45.8° ~47°。Lamare 等^[15]和 Fucale 等^[16]采用直剪仪对 MBT 垃圾进行了直剪试验, 分析了纤维材料对其强度特性的影响, 认为纤维加筋材料影响黏聚力, 有助于增加内摩擦角。Calle^[17]分析了纤维状的成分对垃圾力学性能的影响, 验证了纤维材料不改变内摩擦角的大小、但影响黏聚力的结论。Motta^[18]通过大型直剪试验, 确认了纤维组分在固废剪切强度中的重要性, 由于纤维拉伸应力的作用, 可以得到很高的强度参数。Stela 等^[19]在不伦瑞克理工大学的 Leichtweiss 研究所采用尺寸为 300 mm×300 mm×150 mm 的剪切箱, 对德国 MBT 垃圾土进行了直剪试验, 认为其抗剪强度不仅由颗粒之间的相互摩擦引起, 而且在很大程度上还由类似于形成纤维基质的增强纤维和片状的材料引起, 并得到黏聚力为 16 kPa, 内摩擦角为 40.1°。Baba 等^[20]对印度班加罗尔 Mavallipura 垃圾填埋场的 MBT 垃圾土取样, 利用直剪仪和三轴仪进行不同排水条件下的室内剪切试验, 以 20%应变时的应力作为抗剪强度, 得到直剪时的内摩擦角为 40°, 固结不排水条件的内摩擦角为 55°, 固结排水剪的内摩擦角为 33°, 黏聚力的取值范围为 0~10 kPa, 其抗剪强度与轴向应变有关, 并随着轴向应变的增加而增加; 抗剪强度还与试样的初始密度有关, 随着试样初始密度的增大而增大。Pimolthai 等^[21]对泰国、德国和卢森堡等国的 MBT 垃圾进行了直剪试验, 得到了抗剪强度与有机物的含量有关、也和轻质塑料的含量有关、还与正应力相关并随着正应力的增加而增加的结论。Kuehle-Weidemeier 等^[22]对德国 MBT 垃圾的剪切强度特性进行了研究, 得出了黏聚力在 10~62 kPa 范围内变化的结论。

综上可知, 国外学者大多采用直剪仪, 对 MBT 垃圾的剪切强度特性进行了研究, 但直剪仪有一些缺陷, 这些缺陷包括: 剪切面是人为确定的平面(上下两个剪切盒之间的平面)、该平面上的剪应力分布不均匀, 在边缘处会发生应力集中现象、试验过程中很难

控制排水条件、孔隙水压力很难量测等。三轴试验没有上述局限性, 可以较好地控制排水条件, 可以量测孔隙水压力, 比较接近实际工程的工况。通过上述研究可知, MBT 垃圾的剪切强度特性与其组分有关^[23], 而中国 MBT 垃圾的组分与国外有很大的差别, 且中国在 MBT 垃圾剪切强度特性研究领域尚处于起步阶段, 有必要对中国 MBT 垃圾的剪切强度特性进行研究。借鉴国内学者^[24-26]对生活垃圾剪切强度特性的相关试验研究成果, 本文对杭州 MBT 垃圾的组分进行了分析, 采用三轴压缩仪, 考虑 3 种不同的排水条件, 对 MBT 垃圾的剪切强度特性进行了比较系统地研究, 研究结果可为 MBT 垃圾填埋场的稳定性分析奠定理论基础。

1 试验材料及试样制备

采用杭州天子岭生活垃圾处理场的 MBT 垃圾, 用密封性能良好的塑料桶将 MBT 垃圾运到浙江理工大学环境土工实验室, 垃圾材料见图 1(a)。通过手工分拣的方法, 得到 MBT 垃圾的组分及含量。MBT 垃圾组分含量见表 1。

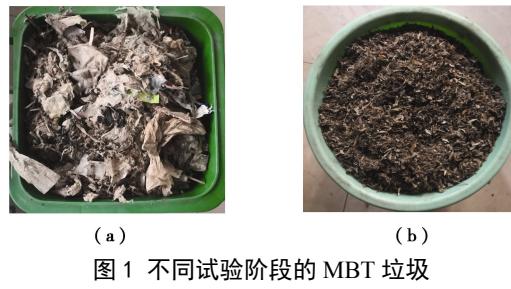


图 1 不同试验阶段的 MBT 垃圾
Fig. 1 Original waste (a) and prepared waste (b)

为了减小尺寸效应对试验结果的影响, 需要对运回来的 MBT 垃圾进行预处理。先去除原始垃圾中尺寸较大的垃圾, 如塑料瓶、大块金属、大块玻璃、大块木头、大块纺织品等, 然后将剩余部分放入烘箱, 在 65℃的温度下烘干至恒重。按照生活垃圾土试验规程中三轴试验垃圾材料粒径不大于试样直径(61.8 mm) 1/8 的制样原则^[27-28], 采用孔径为 7.725 mm 的圆孔筛, 将烘干后的 MBT 垃圾进行过筛, 取筛子底下的筛出物做为试验材料(图 1(b))。将粒径不大于 7.725 mm 的筛余物制成三轴试验所需的重塑试样。操作流程为用电子秤称取 212.36 g 筛分后的 MBT 垃圾, 将其均匀摊铺在土工薄膜上; 称取 106.18 g 的纯净水, 把水均匀的喷洒在 MBT 垃圾上, 均匀拌和, 盖上保

表 1 MBT 垃圾组分含量

Table 1 Contents of various components in MBT waste

(%)

塑料	橡胶	纺织物	木头	石头	陶瓷	玻璃	金属	灰土	无法识别的材料
25.09	5.00	10.72	6.40	4.11	3.00	14.19	2.31	16.36	12.82

鲜膜静置 24 h。将上述 MBT 垃圾分 5 层填入试样模型筒中, 每层的填入量相等, 每层填完后以相同的力量击实, 为了避免垃圾土的分层, 击实后再轻轻扰动表面, 然后再填入下一层, 直到填满为止。为避免试样在拆模后回弹散样, 需要将已制备试样密封并放置一周再拆模。该试样直径为 61.8 mm, 高度为 125 mm, 其基本物理指标: 密度为 0.85 g/cm^3 , 含水率为 50.0%, 颗粒相对密度为 1.71, 孔隙比为 2.02。

2 试验方法及试验过程

采用中型台式三轴压缩仪对制备的试样进行不固结不排水剪、固结不排水剪和固结排水剪试验。试验分别在 50, 100, 200, 300 kPa 4 个不同围压下进行。将试样放置在压力室, 采用水头饱和、反压饱和方法对试样进行饱和。水头饱和时, 进水管与出水管之间的水位差保持 1 m, 当出水量与进水量相等时, 水头饱和完成, 饱和所需时间为 30 min。反压饱和时, 先对试样施加 20 kPa 围压, 开孔压阀, 待孔压稳定时, 记录读数, 关孔压阀。然后分级施加反压, 施加反压的同时分级施加固压, 每级增量为 30 kPa, 同样记录稳定时的孔压, 当经过两级施压时, 围压引起的孔压增量与围压增量之比大于 0.98, 此时认为饱和完成, 反压饱和所需时间为 30 min。对于不固结不排水剪, 饱和完后关闭排水阀门, 先施加 50 kPa 的围压, 再施加竖向偏应力, 以 0.625 mm/min 的速率进行试验^[28], 该级围压试验结束后, 取出试样, 重新装填另外一个相同的试样, 按上述方法分别进行 100, 200, 300 kPa 围压试验, 直到全部试验结束并采集全部的试验数据。对于固结不排水剪, 先对试样进行饱和, 施加 50 kPa 围压, 打开排水阀门对试样进行固结, 固结结束后, 保持围压不变, 关闭排水阀门, 施加竖向偏应力, 以 0.625 mm/min 的速率进行试验^[28], 该级围压试验结束后, 按上述方法分别进行 100, 200, 300 kPa 围压试验, 直到全部试验结束并采集全部的试验数据。对于固结排水剪, 还是先对试样采取水头饱和与反压饱和的方法进行饱和, 然后施加 50 kPa 围压, 打开排水阀门对试样进行固结, 固结完后, 施加偏应力, 以 0.125 mm/min 的速率进行试验^[28], 试验过程中记录体变的读数, 该级围压试验结束后, 按上述方法分别进行 100, 200, 300 kPa 围压试验。试验过程中记录位移计、量力环、孔压计等读数, 同时观察试样的变形情况, 直至试样发生破坏时停止试验。

3 试验结果及分析

3.1 不固结不排水剪试验结果及分析

偏应力与轴向应变的关系见图 2。图 2 可以看出, UU 条件下不同围压的偏应力与轴向应变的关系曲线比较靠近, 基本上与围压无关, 这与理论上饱和土的应力应变曲线在不同围压条件下互相重合的唯一性相符合。图 2 之所以没有完全重合, 是因为 MBT 垃圾组分复杂多样, 有的成分被不透水材料包裹, 试验过程中很难达到完全饱和。随着轴向应变的增大, 偏应力逐渐增大, 当轴向应变超过 15% 时, 应力应变曲线的走势向上翘起, 偏应力增长速率变快, 其原因可能是 MBT 垃圾中含有大量的纤维状材料, 在轴向应变超过 15% 后会表现出很强的加筋特性。

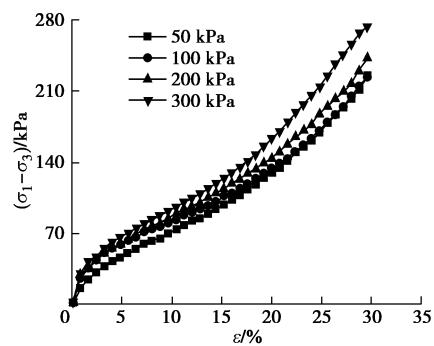


图 2 偏应力与轴向应变的关系

Fig. 2 Relationship between deviatoric stress and axial strain

垃圾填埋场稳定性分析中, 常以 5%, 10%, 15%, 20% 轴向应变下的剪应力作为抗剪强度, 轴向应变 5%, 10%, 15%, 20% 时的强度包线见图 3~6。由图 3~6 可以看出, MBT 垃圾在 UU 条件下的抗剪强度参数范围为黏聚力 c 在 $18.1\sim51.2 \text{ kPa}$, 内摩擦角 φ 在 $4.0\sim5.8^\circ$ 。这与饱和土 UU 试验中强度包线为一条直线, 内摩擦角为 0 不同。对于常规的饱和土, 其成分主要由土颗粒和水组成, 而对于 MBT 垃圾土, 其成分组成比较复杂, 主要由塑料、橡胶、纺织物、木头、陶瓷、玻璃、金属、灰土等组成。其中的塑料和橡胶等是不透水的材料, 小部分垃圾材料可能会被这些不透水的材料包裹, 形成小的密闭空间, 致使试样中存在少量的空气, 当压力增大时, 空气会被压缩, 试样体积减小, 产生体变, 从而引起有效应力的改变, 在强度包线中就表现为一条有一定斜率的直线。

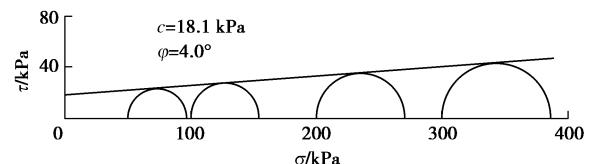


图 3 轴向应变 5% 时的强度包线

Fig. 3 Strength envelopes at axial strain of 5%

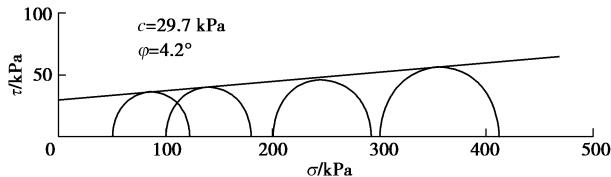


图 4 轴向应变 10% 时的强度包线

Fig. 4 Strength envelopes at axial strain of 10%

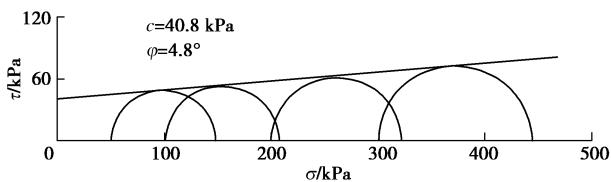


图 5 轴向应变 15% 时的强度包线

Fig. 5 Strength envelopes at axial strain of 15%

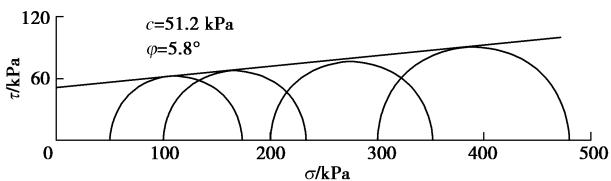


图 6 轴向应变 20% 时的强度包线

Fig. 6 Strength envelopes at axial strain of 20%

3.2 固结不排水剪试验结果及分析

固结不排水剪试验破坏前后的试样见图 7。由图 7 可以看出，试样外观发生了明显的鼓胀破坏。



图 7 试验过程中（左）结束后（右）试样的形状

Fig. 7 Sample before (left) and after (right) tests

偏应力与轴向应变的关系见图 8。图 8 可以看出，轴向应变相同时，不同围压下的偏应力不同，围压越大，偏应力越大，表现出随着围压的增大而增大的现象。其原因可能是随着围压的增大，试样的孔隙比变小，各组分结构变得更加紧密，相互咬合作用增强，摩擦力变大，抵抗变形的能力增强。图 8 还可看出，偏应力随着轴向应变的增大而增大，表现出应变硬化的特征，是一条应变硬化曲线。从偏应力的增长速率来看，在发生轴向变形的起始阶段，偏应力随着轴向

应变的增加而迅速增加，增长速率较快，这是因为固结后试样的孔隙比大大减小，密实度大大增加，各组分之间的距离变小，结构上更致密，摩擦力在竖向压力作用下迅速增大，此时的抗剪强度主要由摩擦力提供。随着轴向应变的继续增大，偏应力也继续增大，但增大的速率变缓，这是因为在轴向应变逐渐增大的过程中，各组分材料之间的细小颗粒由于剪切错动会向疏松多孔材料内部孔隙之间移动。当轴向应变超过 15% 以后，偏应力的增长速率又开始变快，其原因是随着轴向应变的不断累积，试样组分中的细小颗粒已完全移动到疏松多孔材料的内部孔隙中，整个试样已经非常密实，这时候丝状、条状、块状类加筋材料开始发挥出加筋的特性，此时的抗剪强度不仅由各组分之间的摩擦力提供而且还与其中纤维状的加筋材料有关。当这些加筋材料受到拉伸变形时，由于其自身的弹性，在拉伸变形过程中会有抵抗其变形的趋势，这一趋势会给其周围的材料一个反作用力，在这个反作用力下周围土体的滑移错动会受到抑制，从而整个土体的抗剪强度会增强，在应力应变曲线中就表现出偏应力增长速率变快的现象。

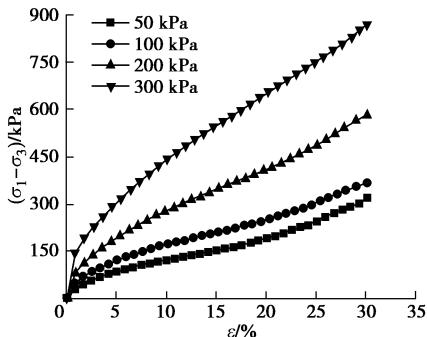


图 8 偏应力与轴向应变的关系

Fig. 8 Relationship between deviatoric stress and axial strain

由于 MBT 垃圾土组分的复杂性和高压缩性，偏应力并没有随轴向应变的增加而出现峰值或接近峰值的点，根据实际填埋场中的衬垫系统、管道系统等承受荷载的容许变形能力，取轴向应变 5%，10%，15% 和 20% 时的剪应力作为抗剪强度，其强度包线见图 9~12。

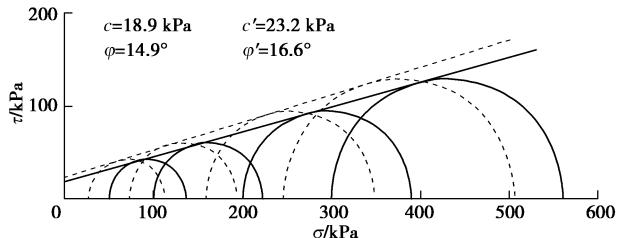


图 9 轴向应变 5% 时的强度包线

Fig. 9 Strength envelopes at axial strain of 5%

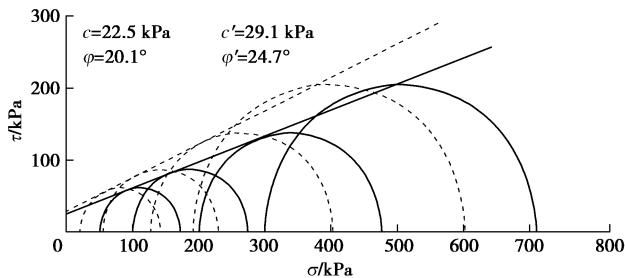


图 10 轴向应变 10% 时的强度包线

Fig. 10 Strength envelopes at axial strain of 10%

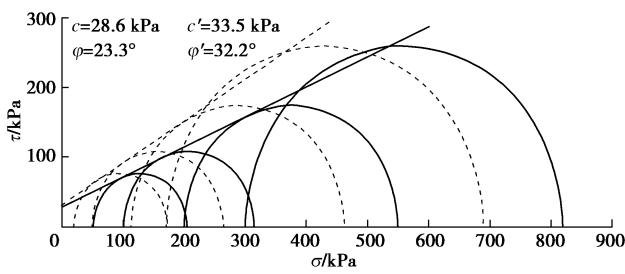


图 11 轴向应变 15% 时的强度包线

Fig. 11 Strength envelopes at axial strain of 15%

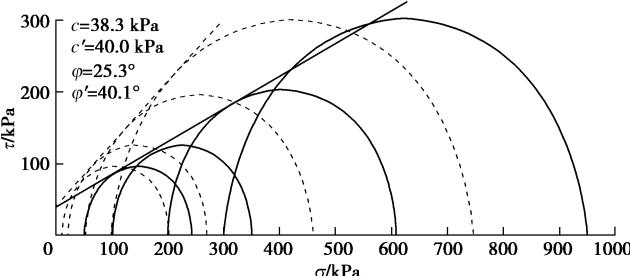


图 12 轴向应变 20% 时的强度包线

Fig. 12 Strength envelopes at axial strain of 20%

3.3 固结排水剪试验结果及分析

固结排水剪条件下的偏应力与轴向应变的关系见图 13。由图 13 可知, 偏应力随着围压的增大而增大, 这与固结不排水剪偏应力与围压的关系基本一致, 其原因是在较大的围压下, 试样的压缩与固结会更完全、更彻底, 试样的孔隙比大大减小, 结构更加致密紧凑, 在竖向压力作用下, 各材料组分之间的咬合摩擦增强, 抵抗变形的能力也随之增强。由图 13 还可看出, 轴向应变超过 30% 后偏应力没有达到峰值, 试样没有明显屈服或破坏。偏应力随着轴向应变的增大而增大, 表现出应变硬化的特征, 但不同轴向应变偏应力的增长速率不同, 在偏应力开始作用的初始阶段, 速率增长非常快, 然后开始变慢, 这是由于在试样的初始压缩阶段, 其抵抗变形破坏的能力是由各材料之间的摩阻力提供, 之后变慢是因为在偏应力作用下, 试样的压缩变形会带动大粒径材料之间的细小颗粒状材料向材料的结构孔隙中蠕动。轴向应变超过 15% 后偏应力的增长又开始变快, 但小于开始阶段, 这是因为细小粒

径状的材料已经完全蠕动到材料之间的结构孔隙中, 在竖向压力的进一步作用下, 细小纤维状的材料开始发挥出加筋作用, 此时试样抵抗变形破坏的能力不仅由摩阻力提供还由细小纤维状材料发挥出的加筋作用提供。

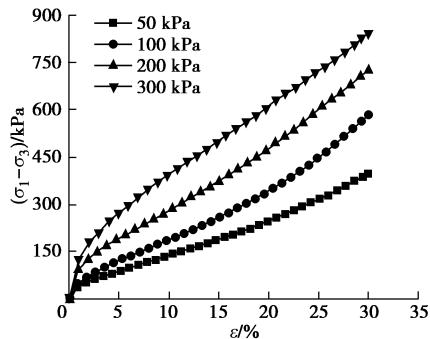


图 13 偏应力与轴向应变的关系

Fig. 13 Relationship between deviatoric stress and axial strain

固结排水剪试样的体积应变与轴向应变的关系见图 14。由图 14 可知, 不同围压下的体积应变不同, 围压越小体变越大, 围压越大体变越小。在较小的围压下, MBT 垃圾没有完全充分的固结变形, 试样结构不是很致密, 而在较大的围压下, 试样的固结变形已经基本完成, 试样结构致密紧凑, 所以在相同的偏应力作用下, 发生相同的轴向应变时, 小围压条件下的试样体积变形更容易发生, 变形量也更大。

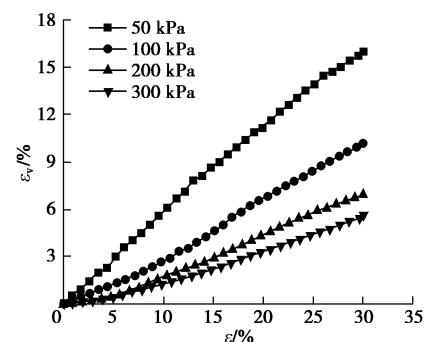


图 14 体积应变与轴向应变的关系

Fig. 14 Relationship between volumetric strain and axial strain

分别取 5%, 10%, 15% 和 20% 轴向应变下的剪应力作为抗剪强度, 其强度包线见图 15~18。

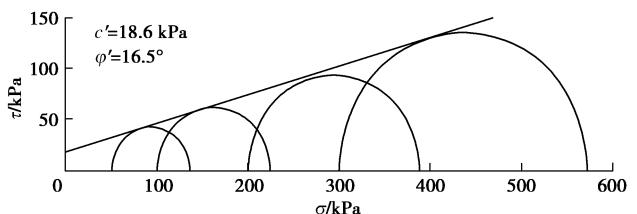


图 15 轴向应变 5% 时的强度包线

Fig. 15 Strength envelopes at axial strain of 5%

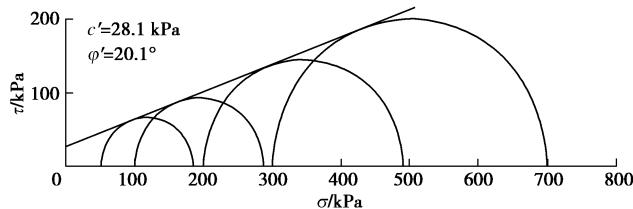


图 16 轴向应变 10% 时的强度包线

Fig. 16 Strength envelopes at axial strain of 10%

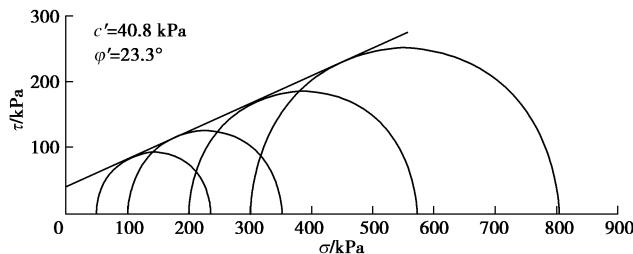


图 17 轴向应变 15% 时的强度包线

Fig. 17 Strength envelopes at axial strain of 15%

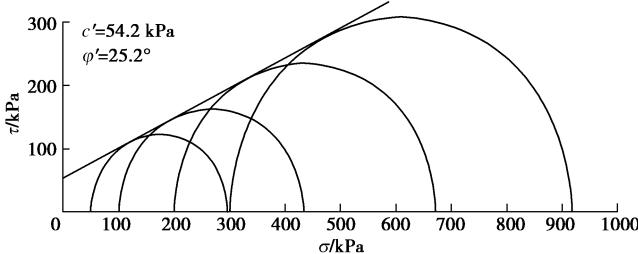


图 18 轴向应变 20% 时的强度包线

Fig. 18 Strength envelopes at axial strain of 20%

3.4 抗剪强度参数与轴向应变的关系

不同轴向应变时的抗剪强度参数见表 2。

由表 2 可知, 对于不固结不排水剪, MBT 垃圾的抗剪强度参数 c 和 φ 的取值范围分别为 $18.1 \sim 51.2 \text{ kPa}$, $4.0^\circ \sim 5.8^\circ$ 。对于固结不排水剪, MBT 垃圾的抗剪强度参数 c , c' , φ 和 φ' 的取值范围分别为 $18.9 \sim 38.3 \text{ kPa}$, $23.2 \sim 40.0 \text{ kPa}$, $14.9^\circ \sim 25.3^\circ$, $16.6^\circ \sim 40.1^\circ$ 。对于固结排水剪, MBT 垃圾的抗剪强度参数 c' 和 φ' 的取值范围为 $18.6 \sim 54.2 \text{ kPa}$, $16.5^\circ \sim 25.2^\circ$ 。根据冯世进等^[29]的研究统计, 未经处理城市生活垃圾土的抗剪强度参数黏聚力 c 为 $0 \sim 80 \text{ kPa}$ 、内摩擦角 φ 为 $5^\circ \sim 40^\circ$, 可见 MBT 垃圾与未经处理生活垃圾的

抗剪强度参数有一定的差别。MBT 垃圾土抗剪强度参数黏聚力的范围一般要小于未经处理生活垃圾黏聚力的范围, 内摩擦角的范围二者比较接近。未经处理生活垃圾有机质的含量很高, 随着有机质的降解, 有机质含量降低, 其抗剪强度参数随之发生变化, 降解龄期对抗剪强度参数有很大的影响。表 2 还可知道, 随着轴向应变的增大, 黏聚力和内摩擦角也会增大, 其关系分别见图 19, 20。图 19, 20 可知, 黏聚力、内摩擦角与轴向应变的关系可以拟合为一条直线, 黏聚力与轴向应变的拟合公式见式 (1) ~ (4), 内摩擦角与轴向应变的拟合公式见式 (5) ~ (8)。

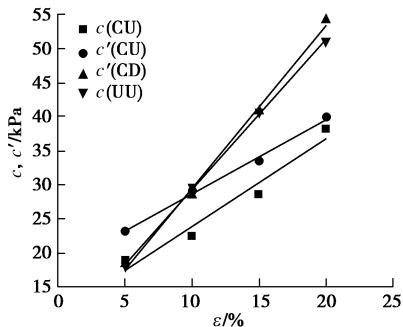


图 19 黏聚力(有效黏聚力)与轴向应变的关系

Fig. 19 Relationship between cohesion (effective cohesion) and axial strain

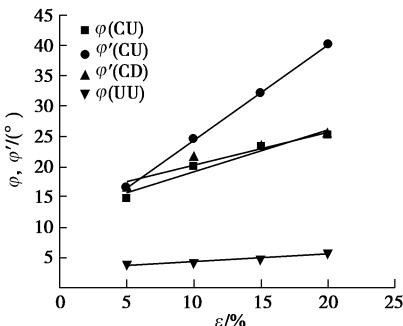


图 20 内摩擦角(有效内摩擦角)与轴向应变的关系

Fig. 20 Relationship between internal friction angle (effective internal friction angle) and axial strain

$$c = 1.3\varepsilon + 11.0 \quad (\text{CU}), \quad (1)$$

$$c' = 1.1\varepsilon + 17.8 \quad (\text{CU}), \quad (2)$$

$$c' = 2.4\varepsilon + 5.8 \quad (\text{CD}), \quad (3)$$

$$c = 2.2\varepsilon + 7.4 \quad (\text{UU}), \quad (4)$$

表 2 不同轴向应变时的抗剪强度参数

Table 2 Shear strength parameters at different axial strains

轴向应变 /%	UU 试验		CU 试验			CD 试验	
	c/kPa	$\varphi /(^{\circ})$	c/kPa	c'/kPa	$\varphi /(^{\circ})$	$\varphi' /(^{\circ})$	c'/kPa
5	18.1	4.0	18.9	23.2	14.9	16.6	18.6
10	29.7	4.2	22.5	29.1	20.1	24.7	28.1
15	40.8	4.8	28.6	33.5	23.3	32.2	40.8
20	51.2	5.8	38.3	40.0	25.3	40.1	54.2

$$\varphi = 0.7\epsilon + 12.3 \quad (\text{CU}) \quad , \quad (5)$$

$$\varphi' = 1.6\epsilon + 8.9 \quad (\text{CU}) \quad , \quad (6)$$

$$\varphi' = 0.6\epsilon + 14.7 \quad (\text{CD}) \quad , \quad (7)$$

$$\varphi = 0.1\epsilon + 3.2 \quad (\text{UU}) \quad . \quad (8)$$

3.5 MBT 垃圾的本构模型

基于固结不排水与固结排水剪试验偏应力与轴向应变关系的一致性, 以固结不排水剪试验结果为例对 MBT 垃圾的本构模型进行分析。由图 8 可以看出, 轴向应变不超过 15% 时, MBT 垃圾的应力应变关系可以拟合为一条双曲线, 符合邓肯-张模型。双曲线的应力应变关系为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon}{a + b\epsilon} \quad , \quad (9)$$

式中, σ_1 为大主应力, σ_3 为围压, ϵ 为轴向应变, a , b 为模型参数。在常规三轴压缩试验中, 式 (9) 也可写为

$$\frac{\epsilon}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon \quad . \quad (10)$$

$\frac{\epsilon}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 与 ϵ 的关系见图 21。

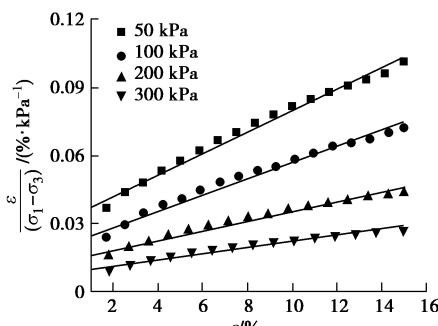


图 21 $\epsilon / (\sigma_1 - \sigma_3)$ - ϵ 的关系

Fig. 21 Relationship between $\epsilon / (\sigma_1 - \sigma_3)$ and ϵ

图 21 可知, $\epsilon / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ϵ 的关系可拟合为一条直线, 拟合相关系数 R^2 均大于 0.94, 拟合效果很好。由图 21 还可得到不同围压下模型参数 a , b 的取值, 见表 3。

表 3 模型参数 a , b 值

Table 3 Values of model parameters a , b

围压/kPa	$a/10^{-2}$	$b/10^{-3}$
50	3.2	4.7
100	2.1	3.6
200	1.4	2.1
300	0.8	1.4

模型参数 a , b 与围压的关系见图 22。图 22 可以看出, 模型参数 a , b 随着围压的增大而减小, 相同围压下 a 大于 b , 模型参数 a , b 与围压的关系可拟合为幂函数:

$$a = 0.4\sigma_3^{-0.7} \quad , \quad (11)$$

$$b = 0.5\sigma_3^{-0.6} \quad . \quad (12)$$

相关系数 R^2 均大于 0.94, 拟合效果很好。

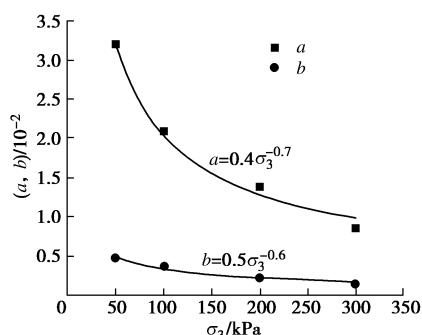


图 22 模型参数 a , b 与围压的关系

Fig. 22 Relationship between model parameters (a , b) and confining pressure

4 结 论

(1) MBT 垃圾组分复杂多样, 压缩性高, 即使轴向应变达到 30% 时, 偏应力也没有达到峰值, 应力应变曲线表现出应变硬化的特性, 属于一种应变硬化材料。

(2) MBT 垃圾的抗剪强度参数取值与排水条件有关, 得到了不同排水条件下 MBT 垃圾的抗剪强度参数黏聚力、内摩擦角和有效黏聚力、有效内摩擦角的取值范围。不固结不排水剪的黏聚力 c 为 18.1~51.2 kPa, 内摩擦角 φ 为 $4.0^\circ \sim 5.8^\circ$; 固结不排水剪的黏聚力 c 为 18.9~38.3 kPa, 内摩擦角 φ 为 $14.9^\circ \sim 25.3^\circ$; 有效黏聚力 c' 为 23.2~40.0 kPa, 有效内摩擦角 φ' 为 $16.6^\circ \sim 40.1^\circ$; 固结排水剪的有效黏聚力 c' 为 18.6~54.2 kPa, 有效内摩擦角 φ' 为 $16.5^\circ \sim 25.2^\circ$ 。

(3) MBT 垃圾的抗剪强度参数 (c , c' , φ , φ') 与轴向应变成正相关, 可以拟合为线性关系, 建立了线性关系表达式。

(4) MBT 垃圾符合邓肯-张模型, 模型参数 a , b 与围压的关系可以拟合为幂函数关系, 建立了幂函数表达式。

(5) 研究结果可为 MBT 垃圾填埋场边坡的稳定性分析提供理论及抗剪强度参数依据。

参考文献:

- [1] 张振营, 张宇翔, 郭文强, 等. MBT 垃圾基本土工特性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2170~2179. (ZHANG Zhen-ying, ZHANG Yu-xiang, GUO Wen-qiang, et al. Laboratory study on the geotechnical properties of MBT waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2170~2179. (in Chinese))

- [2] 李 磊, 袁光钰. 中国城市生活垃圾处理现状及展望[J]. 世界环境, 2017, **169**(6): 24 - 27. (LI Lei, YUAN Guang-yu. Present situation and prospects of municipal solid waste treatment in China[J]. World Environment, 2017, **169**(6): 24 - 27. (in Chinese))
- [3] 罗 媛. 我国城市垃圾围城现状、成因与对策[J]. 经济研究导刊, 2016, **310**(29): 45 - 46. (LUO Yuan. The current situation, reason and countermeasures of MSW in China[J]. Economic Research Guide, 2016, **310**(29): 45 - 46. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 杨 列, 刘 婷, 陈 思, 等. 生活垃圾机械-生物预处理工艺优化[J]. 环境工程, 2011, **29**(6): 89 - 93. (YANG Lie, LIU Ting, CHEN Si, et al. Optimization of mechanical biological pretreatment for MSW[J]. Environmental Engineering, 2011, **29**(6): 89 - 93. (in Chinese))
- [6] 刘 婷, 杨 列, 陈朱蕾, 等. 生活垃圾生物预处理效果研究[J]. 湖北农业科学, 2015, **54**(7): 1693 - 1696. (LIU Ting, YANG Lie, CHEN Zhu-lei, et al. Biological pretreatment of municipal solid waste[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, **54**(7): 1693 - 1696. (in Chinese))
- [7] 屈 阳, 张进锋, 朱卫兵, 等. 城市生活垃圾机械生物处理效果[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(1): 401 - 406. (QU Yang, ZHANG Jin-feng, ZHU Wei-bing, et al. Mechanical biological treatment effect of MSW[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(1): 401 - 406. (in Chinese))
- [8] 吴 珂, 杨再兴, 冯 猛. 封场垃圾填埋场的土地整理及利用[J]. 环境卫生工程, 2013, **21**(4): 16 - 18. (WU Wei, YANG Zai-xing, FENG Meng. Land arrangement and utilization of closed waste landfill sites[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2013, **21**(4): 16 - 18. (in Chinese))
- [9] 赵燕如, 谢 强, 张永兴, 等. 城市生活垃圾降解—压缩特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(10): 1863 - 1871. (ZHAO Yan-ru, XIE Qiang, ZHANG Yong-xing, et al. Experimental study on biodegradation-compression properties of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(10): 1863 - 1871. (in Chinese))
- [10] 许四法, 王国才, 王 哲. 温度和填埋高度引起的垃圾填埋场边坡部土工膜张拉力评价[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3120 - 3124. (XU Si-fa, WANG Guo-cai, WANG Zhe. Evaluation of tensile forces of geomembrane placed on waste landfill slope due to temperature variation and filling height[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3120 - 3124. (in Chinese))
- [11] KÖLSCH F. The Bearing behaviour of domestic waste and related consequences for stability. CISA(Hrsg.)[C]// Proceedings of the 4th International Landfill Symposium. Cagliari, 1993: 1393 - 1410.
- [12] KÖLSCH F. Material values for some mechanical properties of domestic waste. CISA(Hrsg.)[C]// Proceedings of the 5th International Landfill Symposium. Cagliari, 1995: 711 - 729.
- [13] KÖLSCH F. Der Einfluß der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungs-abfall[D]. Braunschweig: Technische Universitaet Braunschweig, 1996. (KÖLSCH F. The influence of fiber components on the shear strength of municipal solid waste[D]. Braunschweig: Technical University of Braunschweig, 1996. (in German))
- [14] POWRIE W, BEAVEN R P. Hydraulic properties of household waste and implications for landfills[J]. Geotechnical Engineering, 1999, **137**(4): 235 - 247.
- [15] DE LAMARE NETO, A. Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos de materiais Granulares com Fibras[D]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. (DE LAMARE NETO, A. The resistance to shear of solid urban waste and granular fiber materials[D]. Rio de Janeiro: Federal University of Rio de Janeiro, 2004. (in Portuguese))
- [16] FUCALE S P. Influência dos Componentes de Reforço na Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos[D]. Pernambuco: Universidade Federal de Pernambuco, 2005. (FUCALE S P. Influence of reinforcement components on the shear strength of municipal solid waste[D]. Pernambuco: Federal University of Pernambuco, 2005. (in Portuguese))
- [17] CALLE J A C. Comportamento Geomecânico de Resíduos Sólidos Urbanos[D]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. (CALLE J A C. Geomechanical behavior of municipal solid waste[D]. Rio de Janeiro: Federal University of Rio de Janeiro, 2007. (in Portuguese))
- [18] MOTTA E de Q. Avaliação da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos com Codisposição de Lodo de Tratamento de esgoto através de Ensaios de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões[D]. Pernambuco: Universidade Federal

- de Pernambuco, 2011. (MOTTA E de Q. Evaluation of the resistance of municipal solid waste with sewage treatment sludge in large-scale direct shear tests[D]. Pernambuco: Federal University of Pernambuco, 2011. (in Portuguese))
- [19] FUCALE S, JOSÉ F T J, MUENNICH K. The mechanical behavior of MBT-Waste[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **20**(13): 5927 – 5937.
- [20] SIVAKUMAR B G L, LAKSHMIKANTHAN P, SANTHOSH L G. Shear strength characteristics of mechanically biologically treated municipal solid waste (MBT-MSW) from Bangalore[J]. Waste Management, 2015, **39**: 63 – 70.
- [21] PIMOLTHAI P, WAGNER J F. Soil mechanical properties of MBT waste from Luxembourg, Germany and Thailand[J]. Songklanakarin Journal of Science & Technology, 2014, **36**(6): 701 – 709.
- [22] Kuehle-Weidemeier. Geotechnical properties and emission behaviour of mechanically and biologically treated municipal solid waste landfill properties of MBT waste[M]. Langenhagen: Report for Waste Consult International, 2006.
- [23] 杜吴鹏, 高庆先, 张恩琛, 等. 中国城市生活垃圾排放现状及成分分析[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(5): 85 – 90. (DU Wu-peng, GAO Qing-xian, ZHANG En-chen, et al. The emission status and composition analysis of municipal solid waste in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, **19**(5): 85 – 90. (in Chinese))
- [24] 施建勇, 朱俊高, 刘 荣, 等. 垃圾土强度特性试验与双线强度包线研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **32**(10): 1499 – 1504. (SHI Jian-yong, ZHU Jun-gao, LIU Rong, et al. Tests on shear strength behavior and envelop of double lines of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **32**(10): 1499 – 1504. (in Chinese))
- [25] 张振营, 严立俊, 吴大志, 等. 新鲜生活垃圾抗剪强度参数变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(3): 432 – 439. (ZHANG Zhen-ying, YAN Li-jun, WU Da-zhi, et al. Experimental study on shear strength parameters of fresh municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(3): 432 – 439. (in Chinese))
- [26] 陈云敏, 郭淇钢, 徐晓兵, 等. 饱和城市固废一维降解固结解析解[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(12): 2137 – 2146. (CHEN Yun-min, GUO Qi-gang, XU Xiao-bing, et al. Analytical solution for one-dimensional degradation-consolidation of saturated municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(12): 2137 – 2146. (in Chinese))
- [27] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [28] CJJ/T 204—2013 生活垃圾土土工试验技术规程[S]. 2014. (CJJ/T 204—2014 Technical specification for soil test of landfilled municipal solid waste[S]. 2014. (in Chinese))
- [29] 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))