

文章编号:1000-582X(2008)02-0202-04

城市固体垃圾的抗剪强度参数

李国成^{a,b}, 但堂辉^{a,b}, 杨武超^{a,b}

(华中科技大学 a. 土木工程与力学学院 b. 控制结构湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘要:在垃圾填埋场设计中,合理地确定垃圾土的抗剪强度参数是十分重要但又困难的工作。城市固体垃圾的抗剪强度参数与正应力水平及轴向应变(或剪切位移)有相关性。根据大量的试验数据及近年来发生的垃圾填埋场失稳案例反分析的结果,建议采用双线性的抗剪强度包线来表征城市固体垃圾的抗剪强度,当正应力为0至60 kPa时, $c' = 22$ kPa, $\varphi' = 36^\circ$,正应力大于60 kPa时, $c' = 30$ kPa 和 $\varphi' = 31^\circ$ 。

关键词:土力学;城市固体垃圾;抗剪强度;参数分析

中图分类号:X705

文献标志码:A

Shear Strength Parameters of Municipal Solid Waste

LI Guo-cheng^{a,b}, DAN Tang-hui^{a,b}, YANG Wu-chao^{a,b}

(a. School of Civil Engineering and Mechanics; b. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: Rational determination of shear strength parameters for municipal solid waste is a very important task in landfill design, but it is really difficult. Shear strength parameters has direct relationship with the normal stress level and axial strain (shear displacement). Based upon testing data and results of back analysis for the landfill failure cases happened in recent years, a bilinear failure envelope is recommended to represent the shear strength of municipal solid waste, which suggests that for normal stresses less than or equal to 60 kPa, shear strength parameters of $c' = 22$ kPa and $\varphi' = 36^\circ$ are recommended and for normal stresses greater than 60 kPa, $c' = 30$ kPa and $\varphi' = 31^\circ$ are recommended.

Key words: soil mechanics; municipal solid waste; shear strength; parametric analysis

近年来发生的多起垃圾填埋场滑坡事故引起了人们对垃圾堆体稳定性问题的高度关注。城市固体垃圾(MSW)填埋场的边坡稳定关系到垃圾填埋场的经济性和安全性,边坡设计过缓,将减少垃圾的容量,致使经济上遭受损失;边坡设计过陡,则容易引起边坡失稳而产生安全问题,从而导致垃圾中渗滤液的泄漏,污染周围环境,给人民的生命财产带来重大损失^[1]。因此,稳定性分析是垃圾填埋场设计中必不可少的环节。而在垃圾堆体稳定性分析中,合

理地确定垃圾土的抗剪强度指标是十分重要但又困难的工作。国内外学者一般采用3种方法对此进行过研究:1)室内实验;2)现场试验;3)反分析。但由于垃圾土材料本身的多变性、试验过程的差异,及对试验结果评价方法的不同,而导致对抗剪强度参数的选取存在着诸多不同意见。本文在总结前人成果的基础上,结合近年来出现的几个垃圾场滑坡事故的反分析结果,提出了城市固体垃圾抗剪强度参数的建议值。

收稿日期:2007-07-20

作者简介:李国成(1973-),男,华中科技大学副教授,博士,主要从事环境岩土工程等方面的研究,
(E-mail) ligcheng@yahoo.com.cn。

1 正应力的作用

正应力的大小是影响填埋场稳定性的因素之一。世界各国的研究者都运用 Mohr-Coulomb 方法来表征城市固体垃圾的剪切强度,由此,城市固体垃圾的剪切强度自然和正应力有相关性,这点已被 Jones et al. 和其他的学者通过实验证明,且 Oggeri 早在 1994 年就提出了建议,城市固体垃圾的剪切强度对正应力达到 110 kPa 时由应力决定,而且推荐了一个应力决定的摩擦角^[2]。

图 1 显示,当正应力从 14 kPa 到 496 kPa 变化时,被激发的摩擦角明显减小,所显示的数据主要是直剪试验的数据,正应力大于 500 kPa 的数据很少。因此,对正应力大于 500 kPa 的情况要谨慎处理。

图 1~3 中括号内的数据是正应力值(kPa),括号前的数字为参考文献序号。

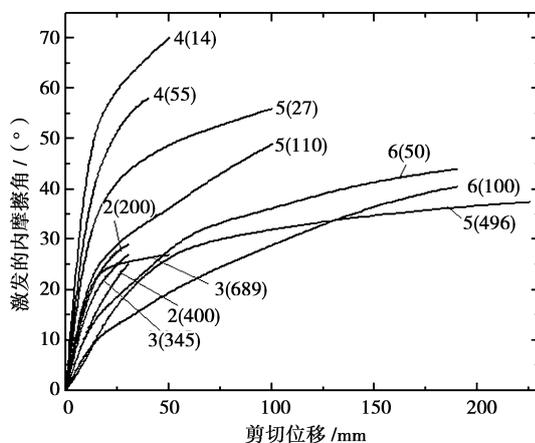


图 1 剪切位移和激发的内摩擦角关系曲线(引自文献[2-6])

图 1 也显示了被激发的摩擦角随着剪切位移的增加而增加,图中曲线说明,只有在剪切位移足够大时,才能激发出更大的内摩擦角,即激发出固体垃圾的峰值强度。

陈云敏通过现场静力触探和三轴试验也证明^[1],垃圾土的粘聚力随着埋深的增加而增加,当埋深 $z < 4.5$ m 时, $\varphi' = 17^\circ$ 、 $c' = 6$ kPa;当埋深 $4.5 < z \leq 14$ m 时, $\varphi' = 17^\circ$ 、 $c' = 11.5$ kPa;当埋深 $z > 14$ m 时, $\varphi' = 17.5^\circ$ 、 $c' = 15.5$ kPa。

无论是新建设的垃圾填埋场还是旧的垃圾填埋场扩建工程,垃圾填埋堆体的高度有越来越高的趋势。堆体越高,就可以增加处理能力。而高应力状态下的城市固体垃圾的室内和现场试验的数据相对缺乏,这也是今后需要不断补充完善的。

2 剪切位移/轴向应变的作用

城市固体垃圾的剪切强度大小决定于剪切位移或者轴向应变的大小,并且有随着变形增大而增大的趋势^[7]。已有的试验研究数据显示,大多数测试在没有达到破坏就结束了,但是在结束以前没有达到峰值剪切强度。

图 2 显示了由对城市固体垃圾的直剪试验得到的典型剪切应力-位移关系。剪切盒 15~100 cm 长,15~100 cm 宽,22~30 cm 高。进行了不同剪切位移的试验,最大剪切位移达到了 250 mm。在大多数试验中,在试验结束的时候,测到的剪应力仍然在增大。从图 2 可以看到,通常要求剪切位移达到 150 mm 以达到 MSW 的最大抗剪能力。

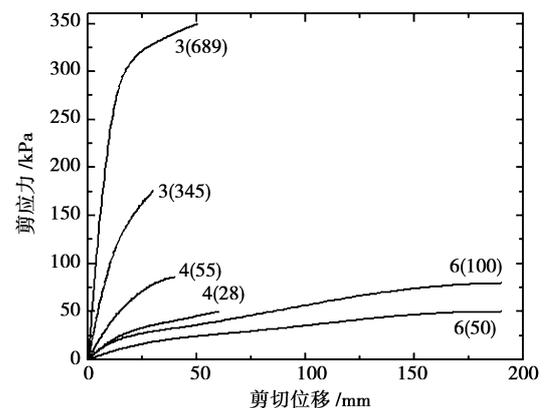


图 2 剪切位移与剪应力关系曲线(引自文献[3,4,6])

Cooper 工程师于 1986 年对 Shelby 地铁的 MSW 试样进行了三轴压缩试验^[8]。试样被压缩的轴向应变超过 30%,抗剪力仍然在增加,没有任何破坏的迹象。Pelkey et al. 对 MSW 在不同剪切位移下的剪切强度做了比较^[5],认为 MSW 的峰值剪切强度在剪切位移达到 100~200 mm 时出现(在 450 mm 长,305 mm 宽有上下剪切盒 300 mm 高的剪切盒中进行试验)。

Grisolia 和 Napoleoni 进行了 MSW 的三轴压缩试验^[9]。试验结果表明,即使在轴向应变超过 20%~30%,也没有激发出峰值剪切强度。Grisolia 等人在试验中发现:被激发的摩擦角和粘聚力是轴向应变的函数,在 10% 的轴向应变下,激发粘聚力为 5 kPa、内摩擦角为 10° ;而当轴向应变为 25% 时,粘聚力为 30 kPa,内摩擦角为 20° 。Vilar 和 Carvalho^[10]描述了直径 200 mm,高为 400 mm 试样的三轴排水压缩试验,试验结果是直到轴向应变高达 30% 时也没有达到破坏。试验数据还显示,MSW 的摩擦抗力在轴向应变小于等于 20% 时可以被全部激发出

来,然而,粘聚力在轴向应变达到 10% 或者更大时消失。从这份数据中,不能分辨出激发出粘聚力的限制应变值。

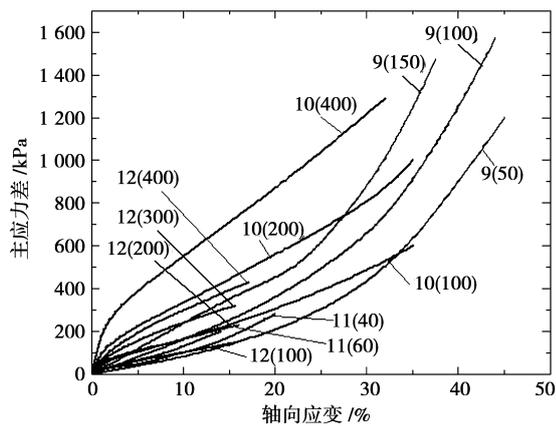


图 3 轴向应变与偏应力关系曲线(引自文献[9-12])

Isenberg^[11]强调,垃圾剪切强度和密度都是现场特定的垃圾成分和实际条件的函数,诸如垃圾类型、成分、日填埋量、含水量、年代、覆盖压力等。文献[11]给出了 $\varphi' = 20 \sim 35^\circ$ 和 $c' = 0 \sim 50$ kPa 的峰值剪切强度。这些剪切强度参数和文献[7]给出的 $\varphi' = 35^\circ$ 、 $c' = 0 \sim 25$ kPa 相吻合。

3 MSW 剪切强度参数分析

3.1 正应力为 0 ~ 60 kPa 时的剪切强度参数

Kavazanjian et al.^[13]和 Van Impe^[14]推荐了正应力低于 30 kPa 时不同的强度参数。例如, Kavazanjian et al. 提出了对 MSW 如下的双线包络线:正应力为 0 至 30 kPa 时, $c' = 24$ kPa, $\varphi' = 0^\circ$, 正应力为 30 ~ 300 kPa 时, $c' = 0$ 和 $\varphi' = 33^\circ$ 。Van Impe 提出了三折线包络线,当正应力为 0 至 20 kPa 时, $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 0^\circ$;当正应力为 20 ~ 60 kPa 时, $c' = 0$ kPa, $\varphi' = 38^\circ$;当正应力为 60 ~ 300 kPa 时, $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 30^\circ$ 。在倾斜的破坏面上,正应力为 20 kPa 时,相当于 3.3 m 深的垃圾堆体,假定其水平土压力系数为 0.5, MSW 单位重度为 12 kN/m³。当正应力为 30 kPa 时,相当于 5 m 深的垃圾堆体。正应力为 60 kPa 时,相当于 10 m 深的垃圾堆体。

在实际的垃圾填埋场,大多数垃圾堆体的高度都大于 5 m,特别是超高堆体,所以破坏包络线的水平部分^[13-14]仅仅适用于通过 MSW 最危险滑动面很小的一部分。敏感性分析显示,与由文献[7]所建议的剪切强度参数相比较,变换最危险滑动面上部 5 米堆体的强度参数(在深埋堆体中,滑动面延伸到衬垫系统)对超过 10 m 深度垃圾堆体的计算安全系

数没有很大的影响。这足以说明,对正应力小于 60 kPa 时的破坏包络线进行细化对表层垃圾堆体破坏有一定的意义,但会增加填埋场设计的复杂程度,且对深层垃圾堆体的稳定性不会产生较大的影响。

3.2 正应力大于 60 kPa 时的剪切强度参数

Pelkey et al.^[5]建议破坏包络线随着正应力增加而降低。Van Impe^[14]也建议:边坡剪应力包络线随着正应力增加而降低。Van Impe 提出^[14],当正应力为 60 至 300 kPa 时, $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 30^\circ$ 。Eid et al. 建议^[7],当正应力小于 350 kPa 时,剪切强度参数 $c' = 25$ kPa, $\varphi' = 35^\circ$ 。根据大量的试验数据及作者根据近年来发生的垃圾填埋场失稳破坏案例反分析的结果,本文推荐的抗剪强度包络线为:正应力为 0 至 60 kPa 时, $c' = 22$ kPa, $\varphi' = 36^\circ$,正应力大于 60 kPa 时, $c' = 30$ 和 $\varphi' = 31^\circ$,如图 4 所示。

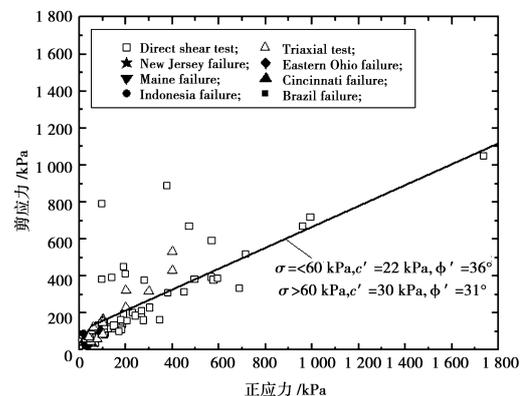


图 4 推荐的 MSW 的抗剪强度破坏包线

图 4 中的直剪试验和三轴试验的数据来自文献[3-5,11-17], Cincinnati, Maine, Eastern Ohio, New Jersey 四处填埋场事故的反分析结果来自文献[7], 印度尼西亚 Bandung 市的 Leuwigajah 填埋场和巴西 Maceio 市的 Cruz das Almas 填埋场事故的数据为笔者的反分析结果。

图 4 中所示双线性破坏包络线更体现出 MSW 是一种高强度材料。MSW 具有很高的强度已被不少工程验证,如在 Cincinnati 填埋场失稳后产生的一个 60 m 高,近乎垂直的堆体,稳定屹立了 10 个月;印度尼西亚 Leuwigajah MSW 填埋场发生的滑坡事故,虽然 MSW 雪崩似地滑动了数百米,但大的块体表面的草皮还清晰可见;Istanbul Umraniye 填埋场边坡 1H:3V (大约 71 度);以色列的 Hiriya 填埋场的 1.2H:1V 和 0.67H:1V 边坡在 1997 年边坡失稳后保持稳定了 5 年。

从图中数据点可以看出,高应力状态下的试验数据相对缺乏,尤其是正应力高于 600 kPa 的数据。随着社会的发展,填埋场的扩建项目将越来越多,且

新建设的填埋场的高度也越来越大,因此,进行高应力状态下的 MSW 抗剪强度试验的需求将越来越大。

4 结 语

1) 工程实例表明,接近垂直的垃圾堆体能保持相当长时间的稳定,说明 MSW 本身的峰值强度很高,这样,在进行试验和稳定性分析时,应更多地考虑与 MSW 接触的材料的强度,如 MSW 与衬垫系统接触面的强度、土工合成材料和下卧土层本身的强度等。

2) 垃圾土的抗剪强度参数与多种因素有关,如垃圾类型、成分、日填埋量、含水量、年代、覆盖压力等,在填埋场稳定性分析中需要考虑这些因素。

3) MSW 的抗剪强度参数和正应力水平有相关性,本文建议采用双线性的抗剪强度包线来表征 MSW 的抗剪强度,当正应力为 0 至 60 kPa 时, $c' = 22$ kPa, $\varphi' = 36^\circ$,正应力大于 60 kPa 时, $c' = 30$ kPa 和 $\varphi' = 31^\circ$ 。

参考文献:

- [1] 陈云敏,王立忠,胡亚元,吴世明,张振营. 城市固体垃圾填埋场边坡稳定分析[J]. 土木工程学报. 2000, 33(3):92-97.
CHEN YUNMIN, WANG LIZHONG, HU YAYUAN, WU SHIMIN, ZHANG ZHENYING. Stability analysis of a solid waste landfill slope. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 92-97.
- [2] JONES R, TAYLOR D, DIXON N. Shear strength of waste and its use in landfill stability analysis[C]// Proceedings of the Conference on Geoenvironmental Engineering, University of Wales, Cardiff, 1997: 343-350.
- [3] HARRIS J M, SHAFER A L, DEGROFF W, et al. Shear strength of degraded reconstituted municipal solid waste[J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 2006, 29(2): 1-8.
- [4] EDINCLILER A, BENSON C H, EDIL T B. Shear Strength of Municipal Solid Waste[R]. Interim Report - Year 1. Environmental Geotechnics Research Report 96-2, prepared for WMX Technologies, Inc., 1996.
- [5] PELKEY S G, VALSANGKAR A J, LANDVA A. Shear Displacement Dependent Strength of Municipal Solid Waste and Its Major Constituent [J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 2001, 24(4): 381-390.
- [6] THOMAS S, ABOURA A A, GOURC J P, et al. An in-situ waste mechanical experimentation on a French Landfill[C]//Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy. 1999.
- [7] EID H, STARK T D, EVANS W D, et al. Municipal Solid Waste Slope Failure I: Waste and Foundation Soil Properties [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng, ASCE, 2000, 126(5): 397-407.
- [8] SINGH S, MURPHY B J. Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills. Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice [M]. Philadelphia, Pennsylvania: ASTM ST P1070, Arvid Landva and David Knowles, 1990: 240-258.
- [9] GRISOLIA M, NAPOLEONI Q, and TANCEDI G. The Use of Triaxial Test for Characterization of MSW [C]// Proceedings of Sardinia '95 - 5th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy, Vol. II, 1995: 761-768.
- [10] VILAR O M, CARVALHO M F. Mechanical Properties of Municipal Solid Waste [J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 2004, 32(6): 1-12.
- [11] ISENBURG R H. Landfill and waste geotechnical stability[R]. Presentation at U. S. EPA Bioreactor Workshop, February 27-28, 2003, Arlington-VA.
- [12] 陈云敏,柯瀚. 城市生活垃圾的工程特性及填埋场的岩土工程问题[J]. 工程力学, 22(增刊):119-126.
CHEN YUN-MIN, KE HAN. Engineering characteristics of municipal solid wastes and geotechnical problems of landfills. Engineering Mechanics, 2005, 22(Sup.): 119-126.
- [13] KAVAZANJIAN E, MATASOVIC N, BACHUS R C. Large-diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste[C]// Proceedings Sardinia 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy, 4-8 October 1999.
- [14] VAN IMPE W F. Environmental Geotechnics: ITC 5 Activities, State of Art [C]// Proceedings, 3rd International Congress on Environmental Geotechnics, Lisbon, Portugal, 1998, 4: 1163-1187.
- [15] LANDVA A O, CLARK J I. Geotechnics of Waste Fill. Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice [M]. Pennsylvania ASTM ST P1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990: 86-103.
- [16] 朱俊高,施建勇,严蕴. 垃圾填埋场固体废弃物的强度特性试验研究[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, 2002:192-196.
- [17] 张振营,吴世明,陈云敏. 城市生活垃圾土性参数的室内实验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 35-39.
ZHANG ZHENYING, WU SHIMING, CHEN YUNMIN. Indoor experimental research on waste fill's engineering parameters [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 35-39.

(编辑 张小强)