

关于我国垃圾土工程性质的探讨^{*}

孟海燕, 王 琳

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

摘 要: 指出垃圾土的工程性质, 是分析垃圾填埋体稳定性必备的基础资料。综合我国学者对垃圾土工程性质的试验研究成果, 分析并总结了垃圾土的某些工程性质的特点, 列出了一些可供设计人员参考的试验数据。

关键词: 垃圾土; 垃圾填埋体; 工程性质

中图分类号: X 705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004 - 2660(2005)03 - 0058 - 04

Approach on Engineering Properties of Garbage Soil in China

MENG Hai - yan, WANG Lin

(Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The article points out that the engineering properties of garbage soil are the necessary basic information to analyze the stability of garbage filling - burying body. By summing up the test and study achievements on engineering properties of garbage soil made by the Chinese scholars and by analyzing the characteristics of certain engineering properties of garbage soil, some test and experimental data have been provided and listed out for reference by other designers.

Key words: Garbage soil; garbage filling - burying body; engineering properties

1 概述

垃圾的处理与处置是环境保护及治理的一个重要方面。目前, 国内外城市生活垃圾处理大多采用卫生填埋技术。填埋技术具有技术可靠、工程规模可大可小、建设工期短、对垃圾成分无严格要求、操作简便、安全性较好、成本低等优点, 特别是对于经济

不发达的我国西部山区城镇, 该方法尤为适用。在当前及今后相当长的一段时间内, 该法仍然是垃圾处理的主要方法。卫生填埋形成的垃圾填埋体, 属于特殊土体的一种, 与一般土体一样, 也存在边坡稳定问题。若要进行垃圾填埋体的稳定分析, 就必须具备基础资料——垃圾土的工程性质指标, 以确定稳定分析采用的物理指标和强度指标。与国

^{*} 收稿日期: 2005 - 06 - 02

作者简介: 孟海燕 (1979 -), 女, 河南人, 在读硕士研究生, 主要从事垃圾 (堆) 体稳定性的研究工作。

外相比, 国内在这方面的研究起步较晚, 而国外的经验不可能直接套用, 加之垃圾土的工程特性及边坡稳定性, 又属于学科的交叉内容 (分属于工程力学和市政工程学科), 因此, 对该类问题的研究较少, 有关垃圾土的物理指标和抗剪强度指标的资料很少, 给工程设计带来很大的盲目性, 造成了不少工程问题。鉴于此, 有必要对有关问题进行研究总结。

在此, 对近年来国内一些学者在垃圾土工程性质方面所做的研究, 进行概括总结, 以便供实际工程设计时参考。

2 国内研究状况及所用试验方法

2.1 国内研究简况及主要研究单位 (或个人)

垃圾土的工程性质指标, 是进行垃圾填埋体稳定性分析必备的基础资料。20 世纪 90 年代初, 伴随着垃圾堆体稳定性研究工作的开展, 垃圾土工程特性的研究工作也展开了 (虽然研究工作开展较国外晚, 但毕竟此方面的工作已经展开)。目前, 我们已能根据国内少量的资料, 并参考国外的资料, 来选定垃圾体稳定性分析时所需的有关资料。

国内对垃圾土工程性质进行研究的有: 青岛建筑工程学院和浙江大学岩土工程研究所。结合杭州天子岭垃圾填埋场, 进行了生活垃圾室内试验的研究, 或着重进行了垃圾土的某一或某些特性的研究。同济大学对垃圾土的动力特性进行了研究; 河海大学的施建勇等、河海大学岩土工程研究所分别对深圳下坪垃圾场垃圾土的强度特性、垃圾土的某些工程特性, 进行了重点研究; 南昌有色冶金设计研究院也对垃圾土的工程特性, 进行了一些探讨; 华东勘测设计研究院亦在此方面有所研究。

2.2 采用的试验方法

天子岭垃圾填埋场室内试验研究, 是用钻机钻取得了填埋场 3 个钻孔的 42 桶原状土样, 进行了室内生活垃圾的成分分析、物理性质指标测定及三轴剪切试验。河海大学研究所所用的 16 筒原状土样, 用薄壁取土器取自深圳下坪填埋场, 由于不同试样测得的物理力学指标相差较大, 所以, 在测定了原状样的含水量和重度后, 将 16 筒试样全部人工搅拌均匀, 制成搅动样, 再进行室内试验。同济大学所做的动力试验, 则是在德国波鸿大学的循环三轴仪上进行的。

综合大量试验资料, 总的来说, 试验方法大多采用的是各种三轴试验 (室内或大型)。

3 试验及资料总结

整理各个试验资料, 并对试验结果进行分析归纳后得到的垃圾土的工程特性:

3.1 垃圾土的天然密度、重度

垃圾土的天然密度 大多落在 $0.9 \sim 1.2 \text{ t/m}^3$ 之间, 这与国外的量测结果基本一致。实测结果表明: 并不随埋深的增大而呈现有规律的变化。这主要是因为生活垃圾是大孔隙结构, 其中的有机物在自重作用下压密需很长时间。而且填埋方式、环境条件, 亦对 的大小有影响。

试验研究结果还表明: 垃圾土的天然重度 并不随埋深的增大而有规律的增大, 这主要与垃圾土中的含水量随埋深 (Z) 增加而减少有关。但垃圾土的干重度 γ_d 则随 Z 的增加而增大。当 $Z \leq 4.5 \text{ m}$ 时, γ_d 的平均值为 7.0 kN/m^3 ; 当 $4.5 < Z \leq 14$ 时, γ_d 的平均值为 7.6 kN/m^3 ; 当 $Z > 14 \text{ m}$ 时, γ_d 的平均值为 8.4 kN/m^3 。这是一组很具参考价值的数值。缺乏当地垃圾土的实测资料时, 可按照不同深度, 参照上述数值, 选定各分层的垃圾土的干重度, 再与含水量、孔隙比等指标一起, 计算出所需的垃圾土重度值。钱学德先生认为, 大多数填埋场对废弃物进行了

压实, 压实比为 $2.1 \sim 3.1$, 建议压实后的垃圾土平均重度值取 $9.4 \sim 11.8 \text{ kN/m}^3$ 。

3.2 垃圾土的天然含水量

垃圾土天然含水量的变化幅度是很大的, 一般分布在 $60\% \sim 110\%$ 之间, 并随埋深的增大而减小。其原因是: 随埋深的增大及埋龄的增加, 垃圾中有机质降解产生的渗滤液由渗滤层排出, 从而使含水量降低; 浅层垃圾土受气候条件的影响较大, 因而含水量较大且不稳定。

垃圾土的含水量通常与下列因素有关: 废弃物的组成成分、当地气候条件、填埋场运行方式 (如是否每天覆土)、渗滤液收集和导排系统的有效程度、填埋场生物分解过程产生的水分数量以及从填埋场气体脱出的水分数量等。

与国外相比, 国内垃圾土的含水量普遍较高。

3.3 垃圾土的天然孔隙比

与普通土相比, 垃圾土由于形成时间较短, 其孔隙比较大。一般来说, 其孔隙比随深度的增大而减少。这是因为: 浅部垃圾土为新近填埋, 生化降解反应进行得不彻底, 使垃圾土的组成颗粒及孔隙比都比较大; 深部因填埋时间较长, 生化降解进行较彻底, 且在上部垃圾土自重压力下形成了较密实的内部结构, 故孔隙比较小。

发达国家垃圾土的孔隙率约为 $40\% \sim 52\%$ (孔隙比为 $0.67 \sim 1.08$), 比一般压实黏土衬垫的孔隙率 (40% 左右) 要高。我国垃圾土的孔隙比变化范围较大, 在部分在 $2 \sim 4$ 之间, 孔隙率约为 $65\% \sim 80\%$, 普遍大于国外的值。

3.4 垃圾土的比重

垃圾土的比重 (相对密度) 大多分布在 $2.0 \sim 2.4$ 之间。比重的大小与垃圾中有机质含量多少有直接关系; 有机质含量多, 则比重小; 反之, 则比重越大。

3.5 有机物含量

有机物含量大多落在 $20\% \sim 40\%$ 之间, 大致随埋深的增加而降低, 这与深部填埋体中的有机质降解有关, 随时间的发展, 这种趋势还会更加明显。从收集到的资料可以发现, 我国经济较发达地区的垃圾土有机质含量较高。

3.6 垃圾土的渗透性

在设计填埋场渗滤液收集系统和制定渗滤液回灌措施时, 正确给定垃圾土的水力参数是很重要的。浙江大学所做的水力渗透试验结果表明, 虽然垃圾土的渗透系数变化范围较大, 但基本上在 $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 的范围之间。总的规律是随填埋深度和填埋时间的增长而减少。经比较, 与国内外其它填埋场的 MSW 的渗透系数值基本一致, 比较资料见表 1。

3.7 垃圾土的压缩性

垃圾土的压缩变形在填埋后就会立即发生, 并在相当长时间内难以确定。现阶段研究压缩性是为了分析填埋场在自身稳定过程中的沉降, 它是压力和时间的函数, 可采用传统的土体压缩理论来分析。垃圾土的变形机理相当复杂, 主要包括: 物理压缩、错动、流变、物理化学变化和生化分解等 (Sower, 1973; Edil, et al., 1990; Edgers, et al., 1992)。在计算主压缩时, 常用的参数是主压缩指数, 为便于应用, 常采用修正主压缩指数 C_c 描述垃圾土的压缩性。计算次压缩沉降时, 则采用次压缩指数 C_a 和修正次压缩指数 C_a 。

影响压缩的因素有: 废弃物的原始容重、压实程度、覆盖层的自重压力以及含水量、填埋深度、组成成分甚至 pH 值、温度等。

3.8 垃圾土的强度及本构关系

目前, 垃圾土的强度仍是用抗剪强度 (内摩擦角 ϕ 和粘聚力 c) 表示 (摩尔 - 库仑破坏准则)。强度参数目前常通过下列 3 种方法确定: 室内试验 (大型 3 轴或直剪

试验等)； 现场试验 (直接或间接测试)； 根据实际填埋场的垃圾边坡反算。

表 1 国内外垃圾土渗透系数综合资料

Tab. 1 Information about Penetration Coefficient of Garbage Soil at Home and Abroad

资料来源	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	测定方法
Fungaroli 等 (1979)	1.1 ~ 1.4	$1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$	粒状垃圾, 渗透仪测定
Schroder 等 (1984)	—	2×10^{-4}	由各种资料综合
Oweis 等 (1986)	6.4 (估算)	10^{-3} 量级	由现场试验资料估算
Landva 等 (1990)	10.0 ~ 14.4	$1 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-2}$	试坑
Oweis 等 (1990)	6.4	1×10^{-3}	抽水试验
Oweis 等 (1990)	9.4 ~ 14.1 (估计)	1.5×10^{-4}	变水头现场试验
Oweis 等 (1990)	6.3 ~ 9.4 (估计)	1.1×10^{-3}	试坑
钱学德 (1994)	—	$9.2 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-3}$	由现场试验资料估算
浙江大学 (天子岭场, 1998)	8.2 ~ 13.8	$2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-3}$	原状土室内试验
张澄博 (1998)	7.0 (干重度)	9.21×10^{-3}	室内试验

据文献统计, 垃圾土摩擦角 ϕ 的变化范围约为 $10 \sim 35^\circ$, 黏聚力 c 的变化范围约为 $0 \sim 6\text{kPa}$ 。需要指出的是, 文献中较小的强度参数数值往往同实际填埋场中垃圾边坡很陡 (有时甚至是接近垂直) 的情况下仍能保持稳定状态的事实相矛盾。

浙江大学岩土工程研究所对杭州某填埋场不同埋深 (Z) 的垃圾土进行了 3 轴试验, 结果表明: 垃圾土应力 - 应变与围压无关。下面 2 个表格是试验数据。

表 2 不同埋深的垃圾土不固结不排水抗剪强度指标 ($\phi = 0^\circ$)

Tab. 2 Index on Non - solidified and Non - drainage Shearing Strength for the Garbage Soil with Different Burying Depth ($\phi = 0^\circ$)

埋深	$Z < 4.5\text{m}$	$4.5\text{m} < Z < 14\text{m}$	$Z > 14\text{m}$
Cu/ kPa	8	16	20

表 3 不同埋深的垃圾土固结不排水抗剪强度指标

Tab. 3 Index on Solidified and Non - drainage Shearing Strength for the Garbage Soil with Different Burying Depth

埋深	$Z < 4.5\text{m}$	$4.5\text{m} < Z < 14\text{m}$	$Z > 14\text{m}$
Cu/ kPa	6	12	18
$\phi / ^\circ$	7	17	17

由于此试验比较典型, 笔者认为上面 2 个表中所示的垃圾土强度指标, 可供设计者在选取不同埋深的垃圾土强度指标时参考。

此外, 河海大学岩土工程研究所, 对深圳市下坪垃圾填埋场的垃圾土所进行的直剪试验, 给出了 2 组强度指标 (固结快剪), 数据如下: 剪位移 4mm 时, $c = 4.5\text{kPa}$, $\phi = 30.6^\circ$; 剪位移 6mm 时, $c = 0.5\text{kPa}$, $\phi = 37.2^\circ$ 。这 2 个位移值均不是通常用于描述土体破坏状态的参数, 即峰值强度。因此,

(下转第 68 页)

参考文献:

- [1] 杨敏英. 深化能源体制改革 推动洁净煤战略实施 [J]. 中国能源, 2005, (2): 22 - 23.
- [2] 胡予红. 煤炭对环境的影响研究 [J]. 中国能源, 2004 年, (1): 32 - 35.
- [3] 和光亚. 还市民洁净的天空 [N]. 云南日报, 2005 - 4 - 5 (5).
- [4] 时 思. 煤炭地下气化促进云南能源结构变革的思考 [J]. 有色金属设计, 2005, (1): 11 - 15.
- [5] 单晓云. 燃煤二氧化硫对大气的污染及可行的控制措施 [J]. 矿业安全与环保, 2005, (2): 30 - 33.
- [6] 邱红杰. 国家将加大企业环境成本 [N]. 云南日报, 2005 - 6 - 19 (3).
- [7] 和光亚. 昆明一季度空气质量均为优良 [N]. 云南日报, 2005 - 4 - 16 (1).

(上接第 61 页)

上述强度指标可以作为一个初步估计的强度指标, 用于稳定分析中是安全的。

试验证明, 当埋深到一定深度后, 属于加工硬化材料的垃圾体和本构关系基本符合 Duncan - Chang 模型。另外, 由大量的资料统计, 并结合事实, 发现垃圾土的抗剪强度具有双线性质。

3.9 垃圾土的动力特性

垃圾土的动力特性包括动模量和阻尼、动力作用下的强度、本构关系等, 受初始剪应力、小应变荷载、荷载频率、垃圾土沉积时间等因素的影响。

我国在这方面的研究文章非常稀少, 仅见同济大学周健教授的 2 篇文章。周教授分别模拟交通荷载和地震荷载情况, 对城市垃圾土的动模量和振动残余应变实验结果进行了分析。重塑垃圾土的循环实验结果表明:

当振动周数少于 50 周时, 动压缩模量随循环周数的增加而降低; 而当振动周数大于 50 周时, 动压缩模量随循环周数的增加而略有增大。但随着振动周数的变化, 动压缩模量降低或增加有限;

当采用非线性动力有限元, 计算分析垃圾堆场在交通荷载作用下的动力反应时, 可用式 (1)、式 (2) 来计算垃圾堆场的振陷:

$$\frac{p_a}{p_{a, n=15}} = \frac{a_1 N_{cyc}}{a_2 + N_{cyc}} + \frac{a_3 N_{cyc}}{a_4 + N_{cyc}} + a_5 N_{cyc} \quad (1)$$

$$\frac{p_a}{p_{a, n=15}} = -0.0347 + 0.408 \frac{d}{0} \quad (2)$$

其中: $\frac{p_a}{p_{a, n=15}}$ 为轴向残余应变; N_{cyc} 为循环荷载周数; d 为循环荷载应力; σ_0 为固结应力; n 为振动周数; $a_1 = 0.539$; $a_2 = 0.988$; $a_3 = 1.750$; $a_4 = 30.1$; $a_5 = -0.00691$ 。

4 结语

本文所做的综合分析, 为填埋场的稳定性分析提供了必要的计算参考指标。

本文所做的结论是为数不多的试验结果的综合, 具有一定的代表性。但因为不同地区垃圾填埋场的特殊特征, 故在实际应用中, 需要根据实际工程的性质选取参考数据。即在正式进行填埋场设计时, 尚需取得当地的专门试验资料。

由于垃圾土的物理、力学指标会随有机质的降解而有所变化, 因此, 关于垃圾土工程性质的研究工作, 还需进一步加深。

垃圾土的动力特性的研究尚不多见, 还需研究者加强对此方面的重视。

参考文献:

- [1] 刘长礼, 等. 垃圾卫生填埋处置的理论方法和工程技术 [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [2] 张振营, 等. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (1): 35 - 39.
- [3] 胡敏云, 等. 城市垃圾填埋场垃圾土压缩变形的研究 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (1): 123 - 126.
- [4] 钱学德, 等. 城市固体废弃物 (MSW) 的工程性质 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20 (5): 1 - 6.
- [5] 陈云敏, 等. 城市固体废弃物的压缩性及填埋场容量分析 [J]. 环境科学学报, 2003, 23 (5): 694 - 698.
- [6] 朱向荣. 杭州天子岭垃圾填埋场扩容可行性研究 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24 (3): 281 - 285.
- [7] 施建勇, 等. 城市生活垃圾变形性质试验研究 [J]. 河海大学学报, 2001, 29 (12): 131 - 134.