

垃圾填埋场斑脱土衬里可行性评价

简文星¹, 嘉门雅史², 金山民政³

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 京都大学工程学院环境工程系, 日本京都 606-8501; 3. 大阪地质研究所, 日本大阪 550-0012)

摘要: 首先对斑脱土衬里(粘土—斑脱土、砂—斑脱土)进行变水头实验, 得粘土—斑脱土的渗透系数为 $6.0 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-8}$ cm/s, 砂—斑脱土的渗透系数为 $1.0 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-9}$ cm/s. 从防渗角度分析, 2 种斑脱土混合物均适合作垃圾填埋场的底层衬里. 然后对斑脱土衬里进行持水与水迁移实验, 评价斑脱土衬里水的迁移特性. 以水迁移实验为基础, 模拟斑脱土衬里与地基 5 种不同含水量的条件, 对斑脱土衬里进行直接剪切实验, 测定斑脱土衬里的剪切强度及斑脱土衬里与地基接触面的剪切强度. 再对斑脱土衬里进行三轴固结不排水实验, 测定其总剪切强度与有效剪切强度. 实验结果表明: 地下水具有很大的潜力从地基流向斑脱土衬里, 从而大大提高斑脱土衬里的含水量; 随着含水量的增加, 粘土—斑脱土、砂—斑脱土衬里的抗剪强度逐渐减小. 根据实验所获得的抗剪强度参数, 选择日本山谷型垃圾填埋场典型剖面, 对山谷型垃圾填埋场进行稳定性评价. 结果表明: 对于角度小于 20° 的缓倾角山谷型垃圾填埋场, 使用粘土—斑脱土、砂—斑脱土作为底层衬里是稳定的. 因此, 2 种斑脱土混合物适合作山谷型垃圾填埋场的底层衬里.

关键词: 斑脱土衬里; 渗透实验; 持水与水迁移实验; 直剪实验; 三轴固结不排水实验; 垃圾填埋场的稳定性.

中图分类号: X53; X705

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)05-0568-07

作者简介: 简文星(1967—), 男, 副教授, 1998 年获中国地质大学地质工程博士学位, 1999 年在日本京都大学从事博士后研究工作, 研究方向为卫生垃圾填埋场的稳定性及人工复合粘土衬里的可行性. E-mail: wxjian@cug.edu.cn

在日本, 许多垃圾填埋场建筑在山谷中. 为了防止渗滤液污染环境, 人工粘土衬里被广泛运用. 然而, 在山谷型垃圾填埋场中建筑人工粘土衬里, 必须重点考虑如下 2 个问题: (1) 人工粘土衬里的渗透系数是否足够小, 能否防止渗滤液的流出; (2) 人工粘土衬里的抗剪强度是否足够大, 能否阻止垃圾沿衬里滑动. 尤其是第 2 个问题在日本尚未引起充分的重视. 根据有关报道^[1~5], 世界上已经有数十个大型垃圾填埋场产生了滑动, 而这些滑动大部分是沿底部衬里出现的. 一般而言, 山谷垃圾填埋场地质条件比较复杂, 特别是地下水位变化很大. 由于高地下水位会导致粘土衬里含水量的增加, 从而导致剪切强度降低, 影响垃圾填埋场的稳定性^[6,7]. 此外, 无机盐、酸、碱等化学物质也将影响粘土衬里的抗剪强度. 因此, 在建筑之前, 对粘土衬里的性质进行评价,

意义非常重要.

1 实验

1.1 实验材料特征

砂—斑脱土衬里由斑脱土与丰浦砂混合构成; 粘土—斑脱土衬里由斑脱土与深草粘土组成. 表 1 列出了斑脱土、丰浦砂与深草粘土 3 种物质的主要物理性质. 据研究, 当斑脱土的含量达到 13% 时, 斑脱土混合物的渗透系数最小^[8]. 因此, 本次研究中, 斑脱土的干重量为丰浦砂、深草粘土的 13%. 由此组成的斑脱土衬里的主要特征如表 2 所示. 对深草粘土、粘土—斑脱土与砂—斑脱土进行击实实验, 得其最大干密度分别为 1.45, 1.43, 1.68 g/cm³.

1.2 渗透实验

渗透实验采用自制的柔壁变水头渗透仪(图 1). 将粘土—斑脱土分别调制成含水量为 28.4%,

表 1 实验材料物理特征
Table 1 Properties of materials

材料	斑脱土	深草粘土	丰浦砂
液限/%	616	55.5	
塑限/%	61	26.6	
密度/(g·cm ⁻³)		2.68	2.64
最大干密度/(g·cm ⁻³)		1.46	1.58
最优含水量/%		29.3	7.5
粒径/mm			0.11, 0.25*

*. D₁₀=0.11 mm; D₉₀=0.25 mm.

表 2 斑脱土衬里的基本物理特征

Table 2 Properties of bentonite mixture liners

斑脱土衬里	砂-斑脱土	粘土-斑脱土
混合比例(干重)	斑脱土 13% 丰浦砂 87%	斑脱土 13% 深草粘土 87%
最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.68	1.42
最优含水量/%	17	31

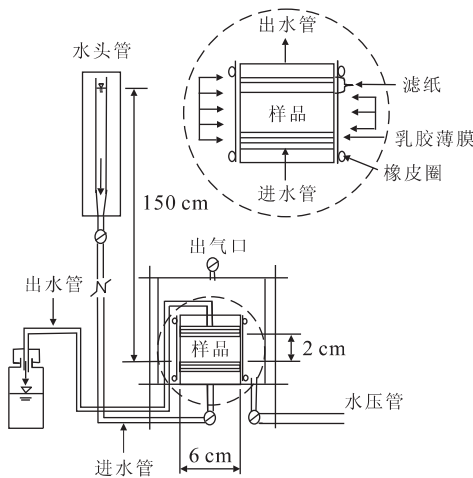


图 1 柔壁变水头实验仪示意图

Fig. 1 Apparatus of falling head permeability test

31.0%, 32.8%, 34.9% 的土样, 将砂-斑脱土调制 成最优含水量土样, 然后分别击实成直径为 60 mm、 高为 20 mm 的样品. 在样品的两端先放上滤纸、透 水石, 然后用乳胶薄膜包起来, 再用橡皮圈捆起来. 为了抑制斑脱土混合物产生膨胀及防止水从样品与 乳胶薄膜接触面之间流出, 将样品放到压力室中, 施 加 30 kPa 的围压.

从图 2 可知, 粘土-斑脱土的渗透系数为 $6.0 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-8}$ cm/s, 砂-斑脱土的渗透系 数为 $1.0 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-9}$ cm/s. 与日本规范值 (厚度大于 50 cm 的垃圾填埋场底层衬里, 其渗透系 数必须小于 1.0×10^{-6} cm/s) 相比, 粘土-斑脱土和

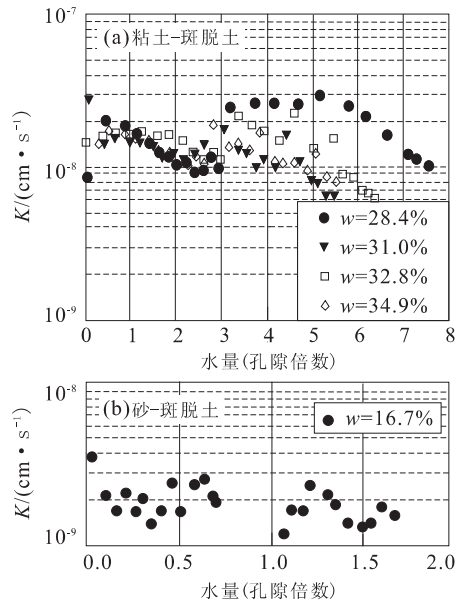


图 2 渗透实验结果

Fig. 2 Results of falling head permeability test

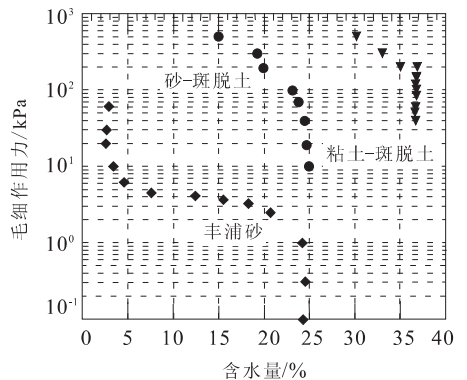


图 3 含水量与毛细作用力的关系

Fig. 3 Matric suction against water content for clay-bentonite, sand-bentonite and Toyoura sand

砂-斑脱土的渗透系数小了很多. 因此, 从防渗角度 分析, 这 2 种斑脱土衬里均适合作垃圾填埋场的底 层衬里.

1.3 持水实验

持水特性对水从地基向粘土衬里的迁移影响很 大, 因此, 在研究斑脱土衬里水迁移规律之前, 有必 要先研究其持水特性. 将斑脱土混合物击实成高 10 mm、直径 50 mm 的样品, 放入三轴压缩实验仪 器的压力室中, 然后施加 100 kPa 的反压力, 使样品 饱和. 当样品饱和以后, 在样品的底部放置一块陶瓷 板(可以承受 500 kPa 以上的气压), 分别对样品施 加 10~500 kPa 的气压进行脱水, 持续时间达 1h.

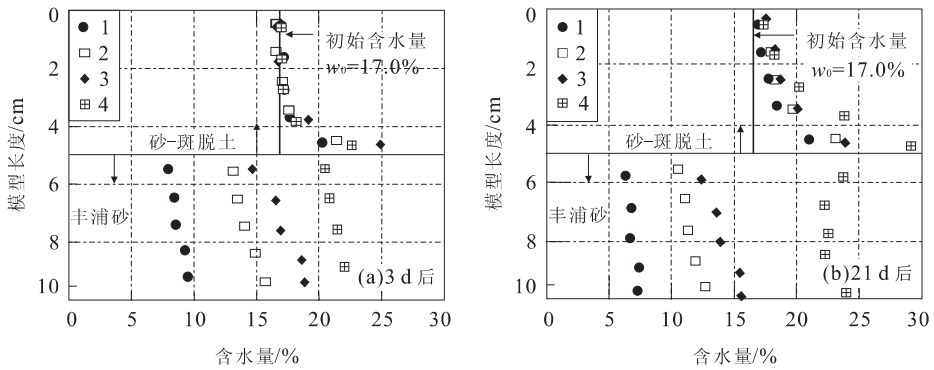


图 4 砂-斑脱土水迁移实验结果

Fig. 4 Water migration test results for sand-bentonite

a. 1, 2, 3, 4 表示丰浦砂的初始含水量分别为 8.4%, 17.1%, 24.6% 及饱和时实验样品含水量的变化; b. 1, 2, 3, 4 表示丰浦砂的初始含水量分别为 9.8%, 14.3%, 18.6% 及饱和时实验样品含水量的变化

最后分别测定样品的含水量。

从图 3 可知, 粘土-斑脱土与砂-斑脱土在最优含水量状态下, 其毛细作用力分别可以达到 450 和 400 kPa, 而丰浦砂(模拟地基)在含水量大于 5% 的条件下的毛细作用力仅仅为 6 kPa。由此可知, 孔隙水具有很大的潜力从地基流向粘土衬里, 从而会大大提高粘土衬里的含水量。

1.4 水迁移实验

水迁移实验是用于评价斑脱土衬里与地基之间水的迁移特性。实验采用内直径为 50 mm、高为 100 mm 的聚氯乙烯管为模型。将丰浦砂调制含水量分别为 10%, 15%, 20%, 25% 的土样, 并分别击实成直径为 50 mm、高为 50 mm 的样品, 放置于模型的下半部。将砂-斑脱土和粘土-斑脱土在最优含水量状态下击实成直径为 50 mm、高为 50 mm 的样品, 放置于模型的上半部, 与丰浦砂接触。在模型的顶部用隔水薄膜封闭起来, 防止水分蒸发。为了模拟斑脱土衬里自重对膨胀的控制作用, 在模型的顶部施加 3.1 kPa 的荷载。实验分 3 组共 24 个样品进行。一组实验时间为 3 d, 一组为 7 d, 另一组为 21 d。实验后每个模型样品从底部到顶部被分成等厚的 10 块, 并分别测每一块的含水量。

实验结果显示(图 4), 3 d 后砂-斑脱土衬里的所有样品的含水量都增加了, 增加最多的是样品的底部, 然后逐渐减小, 但样品的上部增加很少(图 4a)。21 d 后, 样品上部的含水量也有很大程度的增加(图 4b)。与砂-斑脱土一样, 粘土-斑脱土衬里实验 3 d 后所有样品的含水量都增加了, 增加最多的是样品的底部, 增加最少的是样品的顶部。21 d

后, 粘土-斑脱土含水量的分布曲线与 3 d 时的相似, 但含水量普遍增大。

3 组样品水迁移实验结果可以概括如下: (1) 在毛细作用下, 水从地基向粘土衬里迁移; (2) 从地基移向粘土衬里的水, 绝大部分在 3 d 内完成; (3) 实验 21 d 后, 与含水量分别为 10%, 15%, 20%, 25% 的地基接触的粘土-斑脱土, 其接触面附近的水含量分别达到 36%, 36%, 38%, 40%; 砂-斑脱土接触面附近的含水量分别达到 22%, 24%, 24%, 30%。

1.5 直接剪切实验

垃圾填埋场在建筑之后一段时间内, 粘土衬里的含水量在不断增加, 因而其抗剪强度也在不断变化。为了能在室内测定粘土衬里的抗剪强度, 假定垃圾填埋场地基的强度足够大, 并且透水性较好, 因此, 在直接剪切实验中, 用透水石模拟垃圾填埋场的地基。实验分如下 5 种状况进行(表 3): (1) 最优含水量的斑脱土衬里与干透水石; (2) 由水迁移实验确定含水量的斑脱土衬里与饱和但没有水浸泡的透水石; (3) 由水迁移实验确定含水量的斑脱土衬里与饱和且被水浸泡的透水石; (4) 饱和的斑脱土衬里与饱和且被水浸泡的透水石; (5) 斑脱土衬里与透水石的含水量与(3)相同, 但使用的是 0.5 mol/L 的 NaCl 溶液而不是水。实验用标准的直剪仪进行。剪切速率为 0.05 mm/min, 垂向压力分别为 100, 200, 400, 500 kPa。

实验结果见表 3, 在(1)、(2)及(3)状况下, 粘土-斑脱土的内摩擦角分别为 21.4°, 23.4° 及 24.1°, 粘聚力分别为 141, 40, 31 kPa。以上结果说明在(1)、(2)及(3)状况下粘土-斑脱土的内摩擦角很接近,

表 3 直接剪切实验的状况与实验结果

Table 3 Conditions and results of direct shear tests

材料	状况编号	初始条件		剪切强度	
		斑脱土衬里	透水石	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
粘土—斑脱土	(1)	$w_{opt} = 30.0\%$	干	141	21.4
	(2)	$w_m = 38\% \sim 40\%$	饱和但不浸泡	40	23.4
	(3)	$w_m = 38\% \sim 40\%$	饱和且浸泡	31	24.1
粘土—斑脱土与 透水石接触面	(1)	$w_{opt} = 30.0\%$	干	77	24.7
	(2)	$w_m = 38\% \sim 40\%$	饱和但不浸泡	13	26.3
	(3)	$w_m = 38\% \sim 40\%$	饱和且浸泡	16	27.0
	(4)	100%饱和	饱和且浸泡	42	22.0
砂—斑脱土	(1)	$w_{opt} = 16.4\%$	干	111	36.6
	(2)	$w_m = 24\% \sim 26\%$	饱和但不浸泡	67	38.8
	(3)	$w_m = 30\%$	饱和且浸泡	66	38.2
	(5)	NaCl solution	饱和且浸泡	50	44.4
	砂—斑脱土与 透水石接触面	(1)	$w_{opt} = 16.4\%$	干	15
(2)		$w_m = 24\% \sim 26\%$	饱和但不浸泡	11	35.5
(3)		$w_m = 30\%$	饱和且浸泡	9	34.6
(4)		100%饱和	饱和且浸泡	39	23.4

w_{opt} 为最优含水量; w_m 为由水迁移实验确定的含水量。

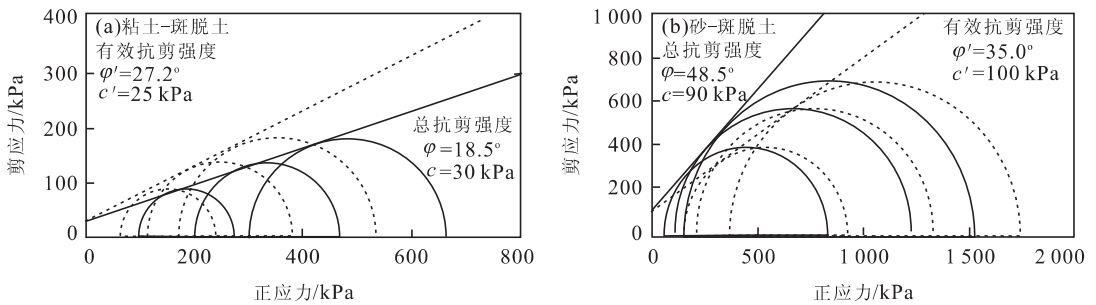


图 5 三轴固结不排水实验结果

Fig. 5 Results of consolidated undrained triaxial compression test

但在状况(1)下所获得的粘聚力比在(2)、(3)状况下所获得的粘聚力大很多。综合分析表 3,在以上 3 种状况下,粘土—斑脱土与透水石接触面、砂—斑脱土、砂—斑脱土与透水石接触面的剪切强度与粘土—斑脱土的剪切强度具有相似的结论。在(4)状况下,粘土—斑脱土、砂—斑脱土与透水石接触面的粘聚力比在(2)、(3)状况下所获得的粘聚力大,但摩擦角却比在(2)、(3)状况下所获得的摩擦角小很多。从以上结果分析可知,随着粘土衬里含水量的增加,粘土—斑脱土、砂—斑脱土及其与地基接触面之间的抗剪强度逐渐减小。砂—斑脱土在状况(5)下的粘聚力与在状况(3)下的相近,但摩擦角增大了 6°。由此说明,在渗滤液中,NaCl 适量的集中不会减小粘土衬里的剪切强度。这与 Jo 等^[9]的研究结果(即在渗滤液中,当 NaCl 的浓度小于 1.0 mol/L 时,对土工膜—粘土衬里的强度没有负面的影响)是一致的。

1.6 三轴固结不排水实验

为了评价斑脱土衬里中孔隙水压力对抗剪强度的影响,对粘土—斑脱土、砂—斑脱土进行三轴固结不排水实验。将粘土—斑脱土、砂—斑脱土在最优含水量下击实成直径为 50 mm、高为 103 mm 的样品。实验中使用如下方法使样品饱和:①先向样品注入 4~5 h 的 CO₂ 以替换样品系统中的空气;②然后向样品注入脱气水,时间为 2~3 d;③最后对粘土—斑脱土施加 150 kPa,对砂—斑脱土施加 300 kPa 的反压力,直至 $B > 0.95$ ^[10]。一般饱和过程需要一周以上的时间。为了模拟快速加载,实验中压缩速率为 0.5 mm/min,对粘土—斑脱土施加的围压分别为 100, 200, 300 kPa,对砂—斑脱土施加的围压分别为 50, 100, 150 kPa。图 5 为 2 种斑脱土衬里的应力莫尔圆与强度破坏包线(有关实验的详细过程及结果请参见文献^[11])。

2 稳定性分析

在日本,大约有 80% 的垃圾填埋分布在陆地,而陆地的绝大部分垃圾填埋场分布在山谷中^[12]. 根据日本山谷型垃圾填埋场的特征,综合概括出一典型的剖面,其几何特征如图 6 所示. 该剖面的地质特征如下:(1) 埋物为垃圾焚烧灰土,天然容重与饱和容重分别为 $15.5, 17.4 \text{ kN/m}^3$ ^[13],抗剪强度参数为 $c=0 \text{ kPa}, \varphi=43^\circ$ ^[14]. (2) 底部为 0.5 m 厚的斑脱土衬里. 其中,粘土—斑脱土的天然与饱和容重分别为: $17.5, 18.5 \text{ kN/m}^3$; 砂—斑脱土的天然与饱和容重分别为: $18.5, 20.5 \text{ kN/m}^3$. (3) 地基很牢固,不会发生滑动. (4) 假定有 2 种类型的滑动面:一种为滑动面沿斑脱土衬里出现,其计算的条块如图 6 所示;另一种为滑动面可能出现在垃圾填埋场的任意部位. (5) 计算工况如表 4 所示,斑脱土衬里的抗剪强度参数来源于前述的直剪实验(表 3)与三轴固结不排水实验(图 5). (6) 计算中考虑地震的影响. 在日本,用于斜坡稳定性分析的典型水平地震系数为 $0.15 \sim 0.25$ ^[15],本次计算选用的最大水平地震系数为 $k_h=0.3$. 计算方法采用普遍条分法(Janbu's generalized procedure of slices),程序采用美国威斯康星大学编制的 Winstable.

图 7 例举了工况 III 的计算成果. 6 种工况的计算结果可以概括如下:从工况 I、II 及 III 计算的各种稳定系数分析可知,随着斑脱土衬里含水量的增加,稳定系数降低,垃圾填埋场的稳定性趋向恶化. 并且随着含水量的增加,铺设砂—斑脱土衬里的垃圾填埋场最有可能沿衬里与基岩的接触面滑动;铺设粘土—斑脱土衬里的垃圾填埋场可能沿衬里的内部,也可能沿衬里与基岩的接触面滑动. 在 6 种工况下,使用砂—斑脱土衬里时垃圾填埋场的稳定系数比使用粘土—斑脱土衬里的稳定系数大. 因此,从垃圾填埋场稳定性的角度分析,砂—斑脱土衬里比粘土—斑脱土衬里更佳.

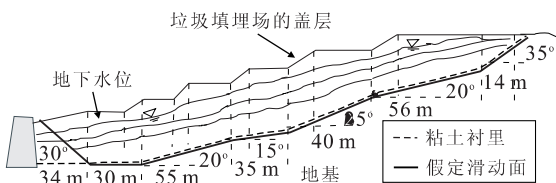


图 6 山谷型垃圾填埋场综合地质剖面

Fig. 6 Cross section of a canyon solid waste landfill

表 4 稳定性计算工况

Table 4 Assumed condition in stability analysis

工况	地下水位	抗剪强度参数
I	低于衬里, 没有水迁移	表 3 中(1)
II	低于衬里, 且有水迁移	表 3 中(2)
III	位于衬里顶部	表 3 中(3)
IV	垃圾高度的 1/4 处	表 3 中(4)及图 5a
V	垃圾高度的 1/2 处	表 3 中(4)及图 5a
VI	垃圾高度的 3/4 处	表 3 中(4)及图 5a

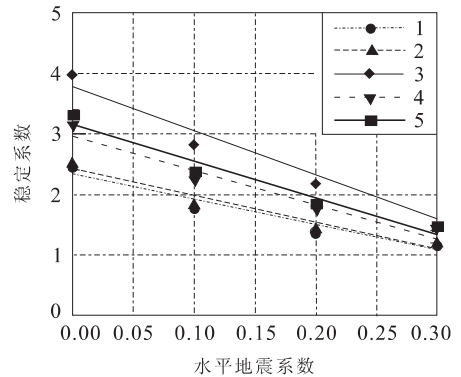


图 7 工况 III 稳定系数与水平地震系数关系

Fig. 7 Variation of factor of safety with horizontal seismic coefficients for case III

1. 沿粘土—斑脱土内部; 2. 沿粘土—斑脱土与地基的接触面; 3. 沿砂—斑脱土衬里的内部; 4. 沿砂—斑脱土与地基接触面; 5. 沿垃圾焚烧灰土内部

从工况 IV、V 及 VI 计算的各种稳定系数分析可知,随着地下水位的提高,垃圾填埋场的稳定性急剧下降. 例如,在不考虑地震作用影响的条件下,对于铺设粘土—斑脱土,在工况 IV 即地下水位为垃圾高度的 1/4,垃圾填埋场的稳定系数为 1.9;在工况 VI 即地下水位为垃圾高度的 3/4,垃圾填埋场的稳定系数下降到 1.4.

地震对垃圾填埋场的影响也很大. 在不考虑地震的影响时,以上 6 种工况所计算的稳定系数都大于 1.4. 在工况 VI 下,当 $k_h > 0.17$ 时,铺设粘土—斑脱土衬里的垃圾填埋场稳定系数小于 1.0;当 $k_h > 0.24$ 时,铺设砂—斑脱土衬里的垃圾填埋场的稳定系数小于 1.0. 垃圾填埋场将会沿斑脱土衬里产生滑动.

3 结论

本文从渗透特性与垃圾填埋场的稳定性两方面对砂—斑脱土与粘土—斑脱土用作山谷型垃圾填埋场底层衬里的可行性进行了研究,主要取得了如下

成果:(1)粘土—斑脱土的渗透系数为 $6.0 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-8}$ cm/s,砂—斑脱土的渗透系数为 $1.0 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-9}$ cm/s. 从防渗作用方面分析,两者均适合作垃圾填埋场的底层衬里。(2)地下水具有很大的潜力从地基流向粘土衬里,从而大大提高粘土衬里的含水量。(3)随着含水量的增加,粘土—斑脱土、砂—斑脱土衬里的抗剪强度逐渐减小。(4)对于角度小于 20° 的缓倾角山谷型垃圾填埋场,使用粘土—斑脱土、砂—斑脱土作为底层衬里是稳定的。(5)从渗透特性与垃圾填埋场的稳定性分析,作为垃圾填埋场底层衬里,砂—斑脱土比粘土—斑脱土更佳。总之,2种斑脱土混合物均适合作山谷型垃圾填埋场的底层衬里。

致谢:胜见武副教授、乾澈先生对本文提出了许多宝贵的意见与建议;森本先生参与了部分实验。在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Koerner R M, Soong T. Stability assessment of ten large landfill failures [A]. In: Zornberg J G, Christopher B R, eds. Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics [C]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2000. 1—38.
- [2] Mitchell J K, Seed R B, Seed H B. Kettleman hills waste landfill slope failure. I: Liner system properties [J]. J Geotech Engrg, 1990, 116(4): 647—668.
- [3] Seed R B, Mitchell J K, Seed H B. Kettleman hills waste landfill slope failure. II: Stability analysis [J]. J Geotech Engrg, 1990, 116(4): 669—690.
- [4] Eid H T, 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 Engineering, 2000, 126(5): 397—407.
- [5] Stark T D, Eid H T, Evans W D, et al. Municipal solid waste slope failure. II: Stability analysis [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 408—419.
- [6] Kamon M, Katsumi M, Jian W, et al. Evaluation of landfill stability relating to clay liners [A]. In: Japanese Geotechnical Society, ed. Proceedings of the fourth Japan national symposium on environmental geotechnology [C]. Tokyo: Japanese Geotechnical Society, 2001. 297—302.
- [7] Kamon M, Katsumi T, Kanayama M, et al. Stability of solid waste landfills along clay liners [A]. In: Japan Society of Civil Engineers, ed. Proceedings of the second international summer symposium [C]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2000. 249—252.
- [8] Imamura S. Geotechnical investigation of natural barrier properties at low level radioactive solid waste landfill site [D]. Kyoto: Kyoto University, 1996.
- [9] Jo H Y, Katsumi T, Benson C H, et al. Hydraulic conductivity and swelling of non-prehydrated GCLs permeated with single species salt solution [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(7): 557—567.
- [10] Black D K, Lee K L. Saturating laboratory samples by back pressure [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(SM1): 75—93.
- [11] Jian W, Kamon M, Kanayama M. Shear strength behavior of two landfill clay liners [J]. Journal of China University of Geosciences, 2002, 13(3): 260—265.
- [12] 简文星. 浅谈日本固体废弃物的管理与处置技术[J]. 环境科学动态, 2002, (4): 1—5.
JIAN W X. Some remarks on management and disposal technology of solid waste in Japan [J]. Environmental Science Trends, 2002, (4): 1—5.
- [13] Hirano K, Takematsu T, Ono S, et al. Settlement characteristics of incinerated ash in Amagasaki offshore disposal site [A]. In: Kansai Branch of the Japanese Geotechnical Society and International Institute for Advanced Studies, ed. Fourth Kansai international geotechnical forum-creation of new geo-environment [C]. Kyoto: Kansai Branch of the Japanese Geotechnical Society, 2000. 107—112.
- [14] Daniel D E. Geotechnical practice for solid waste disposal [M]. New York: Chapman & Hall, 1993. 252—253.
- [15] Abramson L W, Lee T S, Sharma S, et al. Slope stability and stabilization methods [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996. 410.

Feasibility Evaluation of Landfill Bentonite-Enhanced Liners

JIAN Wen-xing¹, Masashi Kamon², Masatami Kanayama³

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Department of Global Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan; 3. Geo-Research Institute, Osaka 550-0012, Japan)

Abstract: In the first part of this paper, the falling head permeability tests were conducted on bentonite-enhanced liner (BEL) specimens (sand-bentonite and clay-bentonite mixtures) to obtain the hydraulic conductivity. The results show that the hydraulic conductivity of clay-bentonite is about $6.0 \times 10^{-9} - 3.0 \times 10^{-8}$ cm/s, and that of sand-bentonite about $1.0 \times 10^{-9} - 3.0 \times 10^{-9}$ cm/s. Compared with the standard hydraulic conductivity used in Japan (1.0×10^{-6} cm/s), the hydraulic conductivity of both clay-bentonite and sand-bentonite is much lower. Then, the water retentivity and water migration tests were performed on the two liner specimens to evaluate the water retention and migration properties from saturated/unsaturated base soil. Based on the above tests, direct shear tests were conducted to obtain the internal shear strength of BEL specimens and the interface shear strength between BEL and base soil under five different water control conditions. Triaxial shear tests were also conducted on the two liner specimens to obtain the total and effective shear strength. Test results show that pore water in the underlying base soil has great potential to migrate to the BELs, resulting in a significant increase in water content of BELs, and the shear strength of both BEL internal and BEL/base interface tends to decrease with the increase of water content in BELs. Finally, the slope stability of a typical canyon solid waste landfill related to the two liners under various conditions was analyzed with the obtained shear strength parameters. Landfills at a gentle slope (with the total angle of the slope not greater than 20 degree) do not fail in both cases of sand-bentonite liner and clay-bentonite liner. Therefore, sand-bentonite and clay-bentonite mixtures are suitable for landfill bottom liners.

Key words: bentonite-enhanced liner; permeability test; water retentivity and water migration test; direct shear test; consolidated undrained triaxial compression test; landfill stability.