

垃圾填埋场沿底部衬垫系统破坏的稳定性分析

冯世进¹, 陈云敏², 高广运¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为研究垃圾填埋场沿底部衬垫系统破坏的稳定性, 将填埋场分为主动楔体、被动楔体和垃圾坝三部分。对它们进行极限平衡分析, 建立平衡方程, 求解填埋场的稳定安全系数。考虑条间力的变化, 可以计算填埋场的最大、最小安全系数 $F_{\max}$ 和 $F_{\min}$, 采用平均安全系数 F_{ave} 来代替真实安全系数 F_{true} , 研究发现, F_{ave} 和 F_{true} 的最大相对误差不超过 5%。 $F_{\max}$ 随着城市固体废弃物内摩擦角 φ_{sw} 的增加逐渐增大, 而 $F_{\min}$ 随着内摩擦角 φ_{sw} 的增大并不改变; $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 和 F_{ave} 都随着垃圾坝高度 H_2 和底部摩擦角 δ_{DA} 的增加逐渐增大, 垃圾坝对填埋场的稳定性有较大影响。

关键词: 城市固体废弃物; 填埋场; 衬垫系统; 稳定性

中图分类号: TD853.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)01-0020-06

作者简介: 冯世进(1978-), 男, 安徽东至人, 博士, 讲师, 主要从事环境土工、土动力学和桩基工程等方面的研究。

E-mail: fsjgly@mail.tongji.edu.cn。

Analysis on translational failure of landfill along the underlying liner system

FENG Shi-jin¹, CHEN Yun-min², GAO Guang-yun¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A limit equilibrium analysis was used to calculate the factor of safety for the waste mass against possible translational failure along the underlying liner system. The landfill could be divided into three parts: an active wedge lying on the back slope that tended to cause failure, a passive wedge and retaining wall resting on the foundation or liner system that helped to resist movement. With the change of interwedge forces, the upper and lower bound solutions for the landfill stability, i.e., $F_{\max}$ and $F_{\min}$, could be readily determined using this method. The average factor of safety F_{ave} was used in this paper, instead of the true factor F_{true} . It was shown that the differences between F_{ave} and F_{true} were within 5% for all cases. $F_{\max}$ increased with the increasing of internal friction angle of municipal solid waste φ_{sw} , however, $F_{\min}$ remained constant. All the factors of safety $F_{\max}$, $F_{\min}$ and F_{ave} increased with the increasing of height of retaining wall H_2 and the friction angle between the retaining wall and the liner system δ_{DA} . It was found that the retaining wall significantly affected the stability of landfill.

Key words: municipal solid waste; landfill; liner system; stability

0 引言

为了防止填埋场中的渗滤液对地下水系统造成污染, 目前一般采用复合衬垫系统进行防渗^[1], 虽然包含有土工织物和粘土层的复合衬垫系统能起到很好的防渗作用, 但由于粘土-土工织物界面、土工织物-土工织物界面之间的剪切强度较低, 较低的剪切强度容易产生沿着界面的滑动, 使得填埋场发生破坏。在美国 Kettleman Hills 填埋场沿底部衬垫系统发生破坏后, Mitchell 和 Seed^[2-3], Stark 和 Poeppel^[4], Byrne^[5], Filz 和 Esterhuizen^[6-7]都对 Kettleman Hills 填埋场的稳定性进行分析, 研究填埋场沿底部衬垫界面破坏的机理, 除了 Byrne^[5]采用有限差分法, Filz 和 Esterhuizen^[6-7]采用有限元法, 其他学者都是采用极限平衡法分析,

利用安全系数评价填埋场的稳定性。

采用传统的极限平衡分析法时, 一般都是对条间力的大小和方向进行假设, 无法真实确定条间力的作用大小和方向, 同时也无法分析城市固体废弃物的强度对填埋场沿衬垫系统滑动的影响。由于填埋场沿衬垫系统发生滑动, 滑动面是已知的, Qian 等^[8-9]提出了与传统条分法不同的极限平衡分析法, 将填埋场分为主动楔体和被动楔体, 然后分别对主、被动楔体进行极限平衡分析, 建立平衡方程, 求解填埋场的稳定安全系数。对绝大部分已建和在建山谷形填埋场, 在

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (50425825); 国家自然科学基金重点资助项目 (50538080)

收稿日期: 2005-10-19

填埋场的坡角处都建有垃圾坝, 用于阻隔渗滤液渗出, 同时增加填埋体的整体稳定性, 如杭州天子岭第二填埋场垃圾坝高度达到 25 m, 不考虑垃圾坝对填埋场整体稳定性的影响, 计算的安全系数与实际情况会有较大差别, 如采用 Qian 等^[8-9]提出的方法分析建有垃圾坝的填埋场的稳定性, 被动楔体将会包括垃圾坝和城市固体废弃物两种材料, 使得计算分析非常困难。所以, 本文在 Qian 等^[8-9]研究的基础上, 将填埋场分为三部分: 主动楔体, 被动楔体和垃圾坝。对它们进行极限平衡分析, 建立平衡方程, 求解填埋场的稳定安全系数, 考虑条间力的变化, 分别计算填埋场沿衬垫系统滑动的安全系数上、下限 $F_{\max}$ 和 $F_{\min}$, 并且采用平均安全系数 F_{ave} 来代替真实安全系数 F_{true} , 同时研究了城市固体废弃物的强度参数及其他地形和材料参数对填埋场沿底部衬垫系统破坏的影响。

1 计算模型的建立及分析

当分析填埋场沿底部衬垫发生滑动时, 滑动面是已知的, 本文采用楔形体分析法计算安全系数, 填埋场的计算简图如图 1 所示。整个填埋场被分为三部分: 位于背部边坡上引起滑动破坏的主动楔体、在底部衬垫上阻碍填埋场滑动的被动楔体和填埋场坡角处阻碍渗滤液渗出的垃圾坝。如果采用传统的极限平衡分析法, 一般假设条间力的作用方向平行于填埋场的前坡或者背坡, 实际上条间力的作用方向既不平行于填埋场的前坡也不平行于填埋场的背坡, 而是可能处于两者之间, 所以传统的极限平衡分析法并不能反映城市固体废弃物的剪切强度对填埋场侧向失稳的影响, 它们可能低估或者高估了填埋场的安全系数。

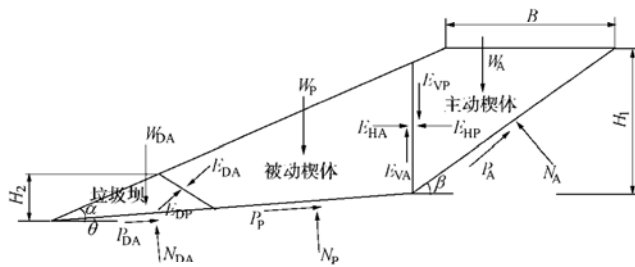


图 1 填埋场各部分极限平衡分析图

Fig. 1 Limit equilibrium analysis of three adjacent wedges for landfill

在图 1 的计算模型中, 设 x 为水平方向, y 为竖直方向, W_A 、 W_P 和 W_{DA} 分别为主动楔体、被动楔体和垃圾坝的重力; N_A 和 F_A 分别为背部边坡作用在主动楔体上的法向力和切向力; E_{HA} 和 E_{VA} 分别为被动楔体作用在主动楔体上的法向力和切向力, E_A 为 E_{HA} 和 E_{VA} 的合力; E_{HP} 和 E_{VP} 分别为主动楔体作用在被动

楔体上的法向力和切向力, E_P 为 E_{HP} 和 E_{VP} 的合力; E_{DP} 为垃圾坝作用在被动楔体上的作用力; N_P 和 F_P 分别为填埋场底部作用在被动楔体上的法向力和切向力; E_{DA} 为被动楔体作用在垃圾坝上的作用力; N_{DA} 和 F_{DA} 分别为填埋场底部作用在垃圾坝上的法向力和切向力; H_1 为填埋场后坡的高度, B 为填埋场顶部的宽度, α 为填埋场前坡坡角, β 为填埋场后坡坡角, θ 为填埋场底部与水平面之间的夹角。

本文假设主、被动楔体之间的作用力沿深度成三角形分布, 主、被动楔体之间的合力与主、被动楔体界面的法线方向成角度 ω , 合力的作用点是在距离界面底部 $H/3$ 处。虽然主、被动楔体之间的作用力对于某个给定的填埋场是唯一的, 但由于其方向是未知的, 这里将其分为两部分: 一部分是垂直于主、被动楔体之间的界面; 另一部分平行于主、被动楔体之间的界面。同时, 假设垃圾坝与被动楔体之间的作用力方向平行于背部边坡。为了在主、被动楔体之间的界面上满足城市固体废弃物的剪切破坏准则, 在这个界面上的平均剪应力应该小于城市固体废弃物的平均剪切强度。这表明主、被动楔体之间界面安全系数 F , 即 F_V , 肯定不能小于 1; 考虑整个填埋场的平衡, 主、被动楔体之间界面安全系数 F_V 也不能小于整个填埋场的安全系数, 填埋场的安全系数在破坏面上所有点都是相同的。孔隙水压力在计算中不考虑, 为了计算的方便, 城市固体废弃物的黏聚力和衬垫界面的黏结力都没有考虑, 这会使得计算的安全系数偏于保守。

1.1 对主动楔体、被动楔体及垃圾坝进行极限平衡分析

主动楔体在 y 方向上满足力的平衡条件, 可得

$$W_A = P_A \sin \beta + N_A \cos \beta + E_{VA} \quad (1)$$

$$P_A = N_A \tan \delta_A / F_A \quad (2)$$

$$E_{VA} = E_{HA} \tan \phi_{sw} / F_V \quad (3)$$

这里假设:

$$m_{sw} = \tan \phi_{sw} / F_V \quad (4)$$

其中, F_A 为主动楔体的安全系数, δ_A 为铺在背部边坡上的衬垫系统界面之间的摩擦角, ϕ_{sw} 为城市固体废弃物的摩擦角。

将式 (4) 代入式 (3) 可得

$$E_{VA} = E_{HA} m_{sw} \quad (5)$$

将式 (2)、(5) 代入式 (1), 可得

$$W_A = N_A \tan \delta_A \sin \beta / F_A + N_A \cos \beta + E_{HA} m_{sw} \quad (6)$$

主动楔体在 x 方向上满足力的平衡条件, 可得

$$P_A \cos \beta + E_{HA} = N_A \sin \beta \quad (7)$$

将式 (2) 代入式 (7), 可得

$$N_A = \frac{E_{HA}}{\sin \beta - \cos \beta \tan \delta_A / F_A} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (6), 可得

$$E_{HA} = \frac{W_A (\sin \beta - \frac{\cos \beta \tan \delta_A}{F_A})}{\cos \beta + \frac{\tan \delta_A \sin \beta}{F_A} + m_{sw} (\sin \beta - \frac{\cos \beta \tan \delta_A}{F_A})} \quad (9)$$

被动楔体在 y 方向上满足力的平衡条件, 可得

$$W_p + E_{VP} = N_p \cos \theta + P_p \sin \theta + E_{DP} \sin \beta, \quad (10)$$

$$P_p = N_p \tan \delta_p / F_p, \quad (11)$$

$$E_{VP} = E_{HP} \tan \varphi_{sw} / F_V, \quad (12)$$

其中, F_p 为被动楔体的安全系数, δ_p 为铺在填埋场底部的衬垫系统界面之间的摩擦角。

将式 (4) 代入式 (12) 得到

$$E_{VP} = E_{HP} m_{sw}. \quad (13)$$

将式 (11) 和式 (13) 代入式 (10) 可得

$$W_p + E_{HP} m_{sw} = N_p \cos \theta + \frac{N_p \tan \delta_p \sin \theta}{F_p} + E_{DP} \sin \beta. \quad (14)$$

被动楔体在 x 方向上也满足力的平衡条件, 可得

$$E_{HP} + N_p \sin \theta = P_p \cos \theta + E_{DP} \cos \beta. \quad (15)$$

将式 (11) 代入式 (15), 可得

$$N_p = \frac{E_{DP} \cos \beta - E_{HP}}{\sin \theta - \cos \theta \tan \delta_p / F_p}. \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (14) 可得

$$E_{HP} = \left[E_{DP} \cos \beta \left(\cos \theta + \frac{\tan \delta_p \sin \theta}{F_p} \right) + E_{DP} \sin \beta \left(\sin \theta - \frac{\cos \theta \tan \delta_p}{F_p} \right) - W_p \left(\sin \theta - \frac{\cos \theta \tan \delta_p}{F_p} \right) \right] / \left[m_{sw} \left(\sin \theta - \frac{\cos \theta \tan \delta_p}{F_p} \right) + \cos \theta + \frac{\tan \delta_p \sin \theta}{F_p} \right]. \quad (17)$$

垃圾坝在 y 方向上满足力的平衡条件, 可得

$$W_{DA} + E_{DA} \sin \beta = P_{DA} \sin \theta + N_{DA} \cos \theta, \quad (18)$$

$$P_{DA} = N_{DA} \tan \delta_{DA} / F_{DA}. \quad (19)$$

其中, F_{DA} 为垃圾坝的安全系数, δ_{DA} 为垃圾坝底部界面之间的摩擦角。

将式 (19) 代入式 (18), 可得

$$W_{DA} + E_{DA} \sin \beta = N_{DA} \tan \delta_{DA} \sin \theta / F_{DA} + N_{DA} \cos \theta. \quad (20)$$

垃圾坝在 x 方向上满足力的平衡条件, 可得

$$E_{DA} \cos \beta + N_{DA} \sin \theta = P_{DA} \cos \theta. \quad (21)$$

将式 (19) 代入式 (21), 得到

$$N_{DA} = E_{DA} \cos \beta / (\cos \theta \tan \delta_{DA} / F_{DA} - \sin \theta). \quad (22)$$

将式 (22) 代入式 (20), 可得

$$E_{DA} = \frac{(\cos \theta \tan \delta_{DA} / F_{DA} - \sin \theta) W_{DA}}{\sin(\theta - \beta) \tan \delta_{DA} / F_{DA} + \cos(\theta - \beta)}. \quad (23)$$

1.2 安全系数方程的建立

对式 (17) 进行化简, 可得

$$E_{HP} = \{ E_{DP} [\cos(\theta - \beta) + \frac{\sin(\theta - \beta) \tan \delta_p}{F_p}] - W_p (\sin \theta - \frac{\cos \theta \tan \delta_p}{F_p}) \} / [m_{sw} (\sin \theta - \frac{\cos \theta \tan \delta_p}{F_p}) + \cos \theta + \frac{\tan \delta_p \sin \theta}{F_p}]. \quad (24)$$

由于 $E_{DA} = E_{DP}$, 将式 (23) 代入式 (24), 可得

$$E_{HP} = \{ W_{DA} (\frac{\cos \theta \tan \delta_{DA}}{F_{DA}} - \sin \theta) [\cos(\theta - \beta) + \frac{\sin(\theta - \beta) \tan \delta_p}{F_p}] - W_p (\sin \theta - \frac{\cos \theta \tan \delta_p}{F_p}) \cdot [\cos(\theta - \beta) + \frac{\sin(\theta - \beta) \tan \delta_{DA}}{F_{DA}}] \} / \{ [m_{sw} (\sin \theta - \frac{\cos \theta \tan \delta_p}{F_p}) + \cos \theta + \frac{\tan \delta_p \sin \theta}{F_p}] [\cos(\theta - \beta) + \frac{\sin(\theta - \beta) \tan \delta_{DA}}{F_{DA}}] \}. \quad (25)$$

这里是分析整个填埋场沿底部衬垫发生的滑动, 所以垃圾坝和被动楔体具有相同的安全系数, 令

$$F_{DA} = F_p = F. \quad (26)$$

将式 (26) 代入式 (25), 化简后可得

$$E_{HP} = \{ W_{DA} (\cos \theta \tan \delta_{DA} - \sin \theta F) [\cos(\theta - \beta) F + \sin(\theta - \beta) \tan \delta_p] - W_p (\sin \theta F - \cos \theta \tan \delta_p) \cdot [\cos(\theta - \beta) F + \sin(\theta - \beta) \tan \delta_{DA}] \} / \{ [m_{sw} (\sin \theta \cdot F - \cos \theta \tan \delta_p) + \cos \theta F + \tan \delta_p \sin \theta] \cdot [\cos(\theta - \beta) F + \sin(\theta - \beta) \tan \delta_{DA}] \}. \quad (27)$$

由于主动楔体和被动楔体具有相同的安全系数,

$F_A = F_p = F$, 所以式 (9) 可以简化为

$$E_{HA} = [W_A (\sin \beta F - \cos \beta \tan \delta_A)] / [(\cos \beta + m_{sw} \sin \beta) F + (\sin \beta \tan \delta_A - m_{sw} \cos \beta \tan \delta_A)]. \quad (28)$$

由于 $E_{HA} = E_{HP}$, 式 (27) 等于式 (28), 通过计算可得

$$aF^3 + bF^2 + cF + d = 0. \quad (29)$$

式中系数 a, b, c, d 可参考文献[10]。

如果真实的 m_{sw} (或者 F_V) 已知, 用式 (29) 就可以计算填埋场真实的稳定安全系数 F_{true} , 那么主、被动楔体间的条间力 E_{HP} 和 E_{VP} 就可通过式 (17) 和式 (13) 计算, 作用在主动楔体、被动楔体及垃圾坝上 N_A, N_p 和 N_{DA} 也可以求得, 但是作用点的位置要通过力矩平衡确定。主动楔体、被动楔体和垃圾坝的重量可以根据填埋场顶部的宽度分为两种情况进行计算^[8-9]。

2 安全系数的计算

2.1 安全系数最大值和最小值的分析

在传统的极限平衡分析法中, 主动楔体和被动楔

体之间的条间力 E_A (或 E_P) 一般假设平行于前坡或者后坡, 如果这样假设条间力的作用方向, 就无法考虑城市固体废弃物的强度对填埋场稳定性的影响, 然而在本文采用的方法中, 考虑了城市固体废弃物剪切强度的影响, 条间力的作用方向为

$$\omega = \tan^{-1}(E_{VP}/E_{HP}) = \tan^{-1}(\tan \varphi_{sw}/F_V) \quad (30)$$

式 (29) 中的 m_{sw} 取决于 F_V 和 φ_{sw} , 由于主动楔体和被动楔体界面滑动的安全系数 F_V 不会小于整个填埋场的安全系数 F , 所以对于 $F \geq 1$ 的情况, 如果取 $F_V = F$, 计算得到的 m_{sw} 是最大值; 对于 $F < 1$ 的情况, 根据前文的假设, 由于 F_V 不能小于 1, 假设 $F_V = 1$, 可以计算得到 m_{sw} 的最大值。当 $F_V = \infty$ 时, 就是 m_{sw} 为最小值的情况, 即 $m_{sw} = 0$, 也就是没有考虑城市固体废弃物剪切强度的影响。由以上分析可知, 当 $F \geq 1$, 取 $F_V = F$, 当 $F < 1$, 取 $F_V = 1$, 可以计算填埋场的最大安全系数 F_{max} ; 当取 $F_V = \infty$, 可以计算填埋场的最小安全系数 F_{min} , 填埋场的真实安全系数 F_{true} 处在最大安全系数 F_{max} 和最小安全系数 F_{min} 之间^[8-9]。

首先计算 F_{min} , 令 $F_V = \infty$, $m_{sw} = 0$, 式 (29) 可以写成下式计算 F_{min} :

$$aF_{min}^3 + bF_{min}^2 + cF_{min} + d = 0 \quad (31)$$

下面计算 F_{max} , 对于 $F \geq 1$, 假设 $F_V = F$, 所以 $m_{sw} = \tan \varphi_{sw}/F$, 将其代入式 (29) 中, 整理后可利用式 (32) 计算 F_{max} 。

$$aF_{max}^4 + bF_{max}^3 + cF_{max}^2 + dF_{max} + e = 0 \quad (32)$$

对于 $F < 1$, 假设 $F_V = 1$, 所以 $m_{sw} = \tan \varphi_{sw}/F_V = \tan \varphi_{sw}$, 将其代入式 (29) 中, 整理后可得式 (33) 计算 F_{max} 。

$$aF_{max}^3 + bF_{max}^2 + cF_{max} + d = 0 \quad (33)$$

2.2 平均安全系数和真实安全系数之间的误差^[8-9]

根据前文的假设, 真实的 m_{sw} (或者 F_V) 并不能确定, 所以真实的 F_{true} 并不能通过式 (29) 求解得到, 本文采用 F_{min} 和 F_{max} 的平均值 F_{ave} 来代替填埋场真实的安全系数 F_{true} , 下面分析 F_{true} 和 F_{ave} 之间的误差。

平均安全系数 F_{ave} 为

$$F_{ave} = (F_{max} + F_{min})/2 \quad (34)$$

真实的安全系数 F_{true} 和平均安全系数 F_{ave} 之间的净误差为 $|F_{true} - F_{ave}|$, F_{true} 和 F_{ave} 之间的相对误差为 $|F_{true} - F_{ave}|/F_{true}$ 。如果 $F_{true} < F_{ave}$, 那么 F_{true} 处在 F_{ave} 和 F_{min} 之间。由于 $F_{min} < F_{true}$, 那么 $F_{ave} - F_{true} < F_{ave} - F_{min}$, 可得

$$(F_{ave} - F_{true})/F_{true} < (F_{ave} - F_{min})/F_{min} \quad (35)$$

如果 $F_{true} > F_{ave}$, 那么 F_{true} 处在 F_{ave} 和 F_{max} 之间。由于 $F_{true} < F_{max}$, $F_{ave} < F_{true}$, 那么 $F_{true} - F_{ave} < F_{max} - F_{ave}$, 可得

$$(F_{true} - F_{ave})/F_{true} < (F_{max} - F_{ave})/F_{ave} \quad (36)$$

由于 $F_{max} - F_{ave} = F_{ave} - F_{min}$, 那么 $|F_{true} - F_{ave}| < F_{ave} - F_{min}$, 或者 $|F_{true} - F_{ave}| < F_{max} - F_{ave}$ 。由于 $(F_{max} - F_{ave})/F_{ave} < (F_{ave} - F_{min})/F_{min}$, 可得

$$|F_{true} - F_{ave}|/F_{true} < (F_{ave} - F_{min})/F_{min} \quad (37)$$

因此, 如果利用平均值 F_{ave} 来代替真实值 F_{true} 那么净误差的上限值为 $(F_{ave} - F_{min})$ 或者 $(F_{max} - F_{ave})$, F_{ave} 和 F_{true} 相对误差的上限值为 $(F_{ave} - F_{min})/F_{min}$ 。

3 城市固体废弃物的强度参数和垃圾坝对填埋场稳定性的影响

下面分析城市固体废弃物的强度参数和垃圾坝对填埋场稳定性的影响。某填埋场背坡坡度 β 为 18.4° ($1:3$), 前坡坡度 α 为 15.95° ($1:3.5$), 底部坡度 θ 为 1.1° (2%), 高度 H_1 为 50 m, 垃圾坝高度 H_2 为 9 m, 顶部宽度 B 为 100 m, 城市固体废弃物的重度 γ_{sw} 为 10 kN/m^3 , 城市固体废弃物的内摩擦角 φ_{sw} 为 22° , 垃圾坝重度 γ_{dam} 为 20 kN/m^3 , 垃圾坝底部摩擦角 δ_{DA} 为 28° , 填埋场底部衬垫界面摩擦角 δ_P 为 17° , 填埋场背部衬垫界面摩擦角 δ_A 为 17° 。当分析某个参数的变化对稳定性的影响时, 其他参数保持不变, 最终的评价结果都是通过安全系数来反映。

图 2 为城市固体废弃物内摩擦角 φ_{sw} 的变化对最大安全系数 F_{max} , 最小安全系数 F_{min} 和平均安全系数 F_{ave} 的影响。 F_{max} 随着内摩擦角 φ_{sw} 的增大逐渐增大, 而 F_{min} 随着内摩擦角 φ_{sw} 的增大并不改变, 这是由于在计算最小安全系数 F_{min} 时, F_V 被认为是 ∞ , 没有考虑内摩擦角 φ_{sw} 的影响, 所以平均安全系数 F_{ave} 也是随着内摩擦角 φ_{sw} 的增加而逐渐增大。由图 3 可以发现, 平均安全系数 F_{ave} 和真实安全系数 F_{true} 之间的最大相对误差 $(F_{ave} - F_{min})/F_{min}$ 随着内摩擦角 φ_{sw} 的增加而逐渐增大, 当内摩擦角 φ_{sw} 在 $15^\circ \sim 50^\circ$ 之间变化时, 最大相对误差小于 4.52% 。

图 4 为垃圾坝高度 H_2 的变化对 F_{max} , F_{min} 和 F_{ave} 的影响。 F_{max} 、 F_{min} 和 F_{ave} 都随着垃圾坝高度 H_2 的增加逐渐增大。如果不考虑垃圾坝的影响, F_{ave} 为 1.56; 当垃圾坝高度 H_2 为 5 m 时, F_{ave} 为 1.62; 当垃圾坝高度 H_2 为 10 m 时, F_{ave} 为 1.81; 当垃圾坝高度 H_2 为 17 m 时, F_{ave} 为 2.25, 可以发现, 垃圾坝对填埋场的稳定性有较大影响。图 5 为垃圾坝高度 H_2 的变化对 F_{ave} 和 F_{true} 之间的最大相对误差 $(F_{ave} - F_{min})/F_{min}$ 的影响。可以发现, 当垃圾坝高度小于 9 m 时, 随着 H_2 的增加最大相对误差变化不大, 当垃圾坝高度大于 9 m 时, 随着 H_2 的增加最大相对误差变化逐渐减小。当 H_2 在 $0 \sim 17 \text{ m}$ 之间变化时, 最大相对误差小于 1.54% 。

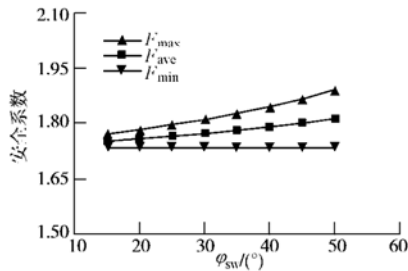


图2 安全系数随着城市固体废弃物内摩擦角的变化

Fig. 2 Relationship between internal friction angle of municipal solid waste and factor of safety

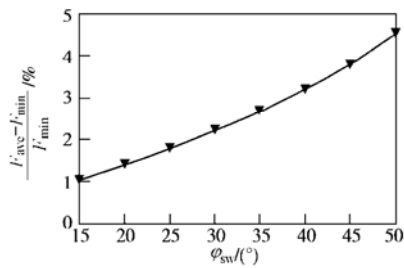


图3 最大相对误差随着城市固体废弃物内摩擦角的变化

Fig. 3 Relationship between the maximum relative error and internal friction angle of municipal solid waste

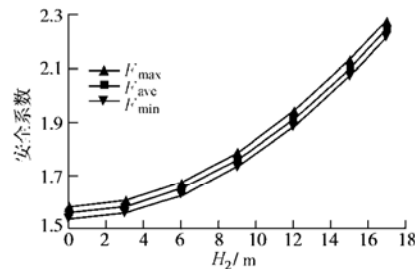
图4 垃圾坝高度 H_2 对安全系数的影响

Fig. 4 Relationship between height of retaining wall and factor of safety

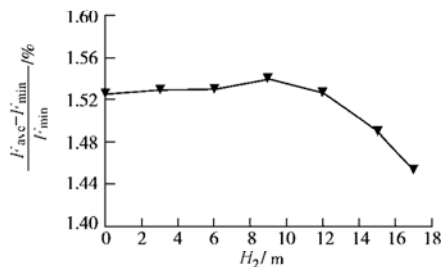
图5 最大相对误差随着垃圾坝高度 H_2 的变化

Fig. 5 Relationship between the maximum relative error and height of retaining wall

图6为垃圾坝底部界面摩擦角 δ_{DA} 的变化对 F_{max} 、 F_{min} 和 F_{ave} 的影响。 F_{max} 、 F_{min} 和 F_{ave} 都随着垃圾坝底部摩擦角 δ_{DA} 的增加逐渐增大, 但不同的 δ_{DA} 计算得 F_{ave} 和 F_{true} 之间的最大净误差 $(F_{ave} - F_{min})$ 变化不大。图7为垃圾坝底部摩擦角 δ_{DA} 的变化对 F_{ave} 和 F_{true} 之间的最大相对误差 $(F_{ave} - F_{min}) / F_{min}$ 的影响。可以发现

当 δ_{DA} 小于 20° 时, 随着 δ_{DA} 的增加最大相对误差逐渐增大; 当 δ_{DA} 大于 20° 时, 随着 δ_{DA} 的增加最大相对误差逐渐减小。当 δ_{DA} 在 $10^\circ \sim 45^\circ$ 变化时, 最大相对误差小于 1.55%。

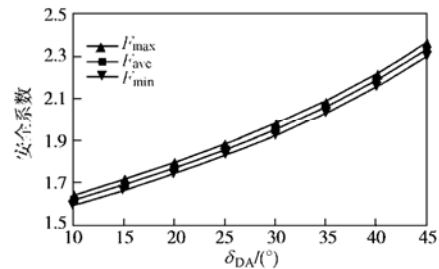
图6 垃圾坝底部摩擦角 δ_{DA} 对安全系数的影响

Fig. 6 Relationship between friction angle under retaining wall and factor of safety

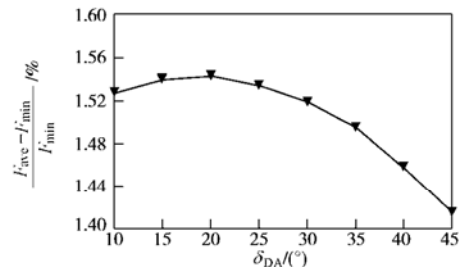
图7 最大相对误差随着垃圾坝底部摩擦角 δ_{DA} 的变化

Fig. 7 Relationship between the maximum relative error and friction angle under retaining wall

除了分析城市固体废弃物的强度参数和垃圾坝对填埋场稳定性的影响外, 还分析了填埋场地形参数和界面强度参数对填埋场稳定性的影响, 将总共 89 种工况条件下计算得到的 F_{ave} 和 F_{true} 之间的最大相对误差 $(F_{ave} - F_{min}) / F_{min}$ 与 F_{ave} 的关系整理成如图 8 所示。对于不同条件下得到的 F_{ave} 和 F_{true} 之间的最大相对误差都小于 5%, 绝大部分甚至都小于 2.5%。可以发现, 采用 F_{ave} 代替 F_{true} 在精度上是可以保证的。

如果 F 已知, 通过式 (29) 和式 (4) 就可以计算 F_V , 为了保证计算的安全系数合理, 主动楔体和被动楔体之间垂直界面发挥的摩擦角 $(\varphi_{sw})_{req}$ 必须小于城市固体废弃物的真实摩擦角 φ_{sw} , 也就是说 F_V 必须要大于 1。尽管这个条件是必要的, 但不是充分的, 因为一般最临界的破坏面都与垂直面有一定角度, 因此 $(\varphi_{sw})_{req}$ 应该远小于 φ_{sw} , 也就是说 F_V 远大于 1, 如果令 $F_V = 1$, 那么在整个滑动体内, MSW 的剪切强度都不会超过。

为研究上文各条件下得到的平均安全系数 F_{ave} 是否合理, 文中不同的 α , β , θ , H_1 , H_2 , B , γ_{sw} , φ_{sw} , γ_{dam} , δ_{DA} , δ_p , δ_A 等参数变化共有 89 种工况, 将各种条件下计算得到的平均 F_{ave} 和 F_V / F_{ave} 的关系整理成如图 9 所示。可以发现所有的 F_V / F_{ave} 都在 1.95~2.05 之

间变化,主要集中在2左右,这与Qian等计算的结果比较接近^[8-9]。 F_V/F_{ave} 的最大值2.03是在 F_{ave} 等于0.87时得到的。这就表明各种情况下与 F_{ave} 相对应的 FS_V 不仅大于1,还比 F_{ave} 要大的多。因此,这种方法计算的结果在理论上是合理的,城市固体废弃物的剪切强度在整个填埋体内部都不会被超过。

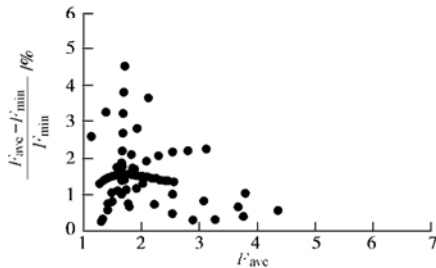


图8 不同平均安全系数对应的最大相对误差

Fig. 8 The maximum relative error for different calculated cases

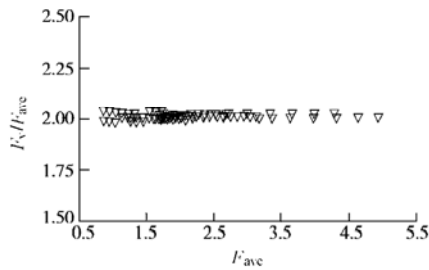


图9 不同的 F_{ave} 对应的 F_V/F_{ave}

Fig. 9 Ratio of F_V to F_{ave} for different calculated cases

4 结 语

(1) 为了考虑垃圾坝对填埋场整体稳定性的影响,将填埋场分为3部分:主动楔体、被动楔体和垃圾坝,对它们进行极限平衡分析,建立平衡方程,求解填埋场的稳定安全系数。

(2) 考虑条间力的变化,当 $F \geq 1$,取 $F_V = F$,当 $F < 1$,取 $F_V = 1$,可以计算填埋场的最大安全系数 F_{max} ;当取 $F_V = \infty$,可以计算填埋场的最小安全系数 F_{min} ,填埋场的真实安全系数 F_{true} 处在最大安全系数 F_{max} 和最小安全系数 F_{min} 之间。

(3) 分别计算填埋场沿着衬垫系统滑动的安全系数上、下限 F_{max} 和 F_{min} ,并且采用平均安全系数 F_{ave} 来代替真实安全系数 F_{true} ,研究发现 F_{ave} 和 F_{true} 之间的最大相对误差不超过5%。

(4) F_{max} 、 F_{min} 和 F_{ave} 都随着垃圾坝高度 H_2 和底部摩擦角 δ_{DA} 的增加逐渐增大,垃圾坝对填埋场的稳定性有较大影响。

(5) F_{max} 随着内摩擦角 φ_{sw} 的增大逐渐增大,而 F_{min} 随着内摩擦角 φ_{sw} 的增大并不改变,这是由于在计算最小安全系数 F_{min} 时, F_V 被认为是 ∞ ,没有考虑内摩擦角 φ_{sw} 的影响,所以平均安全系数 F_{ave} 也是随着内摩擦角 φ_{sw} 的增加而逐渐增大。

参考文献:

- [1] CJJ17—2004 生活垃圾卫生填埋技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.(CJJ17—2004 Technical code for municipal solid waste sanitary landfill [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.(in Chinese))
- [2] MITCHELL J K, SEED R B. Kettleman Hills waste landfill slope failure. I: liner-system properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(4): 647 - 668.
- [3] SEED R B, MITCHELL J K, SEED H B. Kettleman hills waste landfill slope failure. II: stability analyses [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(4): 669 - 690.
- [4] STARK T D, POEPEL A R. Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **120**(3): 597 - 615.
- [5] BYRNE J R. Design issues with displacement-softening interfaces in landfill liners[C]// Waste Tech'94, 1994.
- [6] FILZ G M, ESTERHUIZEN J B, DUNCAN J M. Progressive failure of lined waste impoundments [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **27**(10): 841 - 848.
- [7] ESTERHUIZEN J B, FILZ G M, DUNCAN J M. Constitutive behavior of geosynthetic interfaces [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(10): 834 - 840.
- [8] QIAN Xue-de, KOERNER R M, GRAY D H. Translational failure analysis of landfills [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(6): 506 - 519.
- [9] QIAN Xue-de, KOERNER R M, et. al. Effect of apparent cohesion on translational failure analysis of landfills [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **30**(1): 71 - 80.
- [10] 冯世进. 城市固体废弃物静动力强度特性及填埋场的稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.(FENG Shi-jin. Static and dynamic strength properties of municipal solid waste and stability analysis of landfill [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.(in Chinese))