

文章编号: 1000-7598 (2013) 09-2608-07

加肋土工膜衬垫系统稳定性分析

高俊丽, 张孟喜

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

摘 要: 针对填埋场衬垫系统薄弱界面容易失稳, 在加肋土工膜与砂土界面力学机制分析的基础上, 改进了传统双楔体分析法, 考虑了加肋土工膜肋块端部端承阻力对衬垫系统稳定性的影响, 建立了加肋土工膜衬垫系统稳定性分析解析解。结合某实际工程初步设计, 对加肋土工膜衬垫系统进行了稳定性分析, 探讨了肋块形状、肋块高度和加肋间距对衬垫系统安全系数的影响。分析结果表明, 该解析解能更好地计算加肋土工膜衬垫系统的安全系数。当加肋间距为 20 mm 时, 肋块高度对安全系数的影响较大; 当肋块高度一定时, 安全系数随着加肋间距增加而逐渐减小; 在加肋间距大于 200 mm 之后, 加肋土工膜已接近光面土工膜的剪切特性。

关 键 词: 加肋土工膜; 界面强度; 衬垫系统; 稳定性

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Stability analysis of reinforced geomembrane liner system

GAO Jun-li, ZHANG Meng-xi

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The weak interface of landfill liner system is easy to be instable. Based on the mechanism analysis of reinforced geomembrane and sand interface, and combined with the traditional two wedges analysis model, the bearing resistance effect on the stability of the landfill liner system is considered; and an analytic solution of the slope stability is also built. Associated with the preliminary design of practical projects, the stability of reinforced geomembrane liner system is studied. The effects of reinforcement shape, reinforcement height and reinforcement space on the slope stability are analyzed. Analysis results show that this analytic solution can better calculate the safety factor of reinforced geomembrane liner system. When the reinforcement space comes to 20 mm, the effect of reinforcement height on safety factor is bigger. When the reinforcement height reaches a certain value, the safety factor decreases with the increasing reinforcement space. But if the reinforcement space is larger than 200 mm, the shear properties of reinforced geomembrane are close to that of smooth geomembrane.

Key words: reinforced geomembrane; interface strength; liner system; stability

1 引 言

现代垃圾填埋场是目前最通用和有效处理固体垃圾的方法。衬垫系统材料和覆盖物一般为黏性土、土工合成材料(如土工膜、土工布和土工格栅),以及它们的组合物等,这些衬垫系统材料界面抗剪强度小于垃圾体本身的抗剪强度,很容易在衬垫系统和垃圾体之间形成滑动面,增加填埋场失稳和变形的可能性^[1-3]。因此,填埋场衬垫系统与垃圾体界面之间的稳定性是设计、施工、运营和封闭后考虑

的最重要因素。国内外学者对填埋场稳定性分析做了大量的研究。Mitchell 等^[4]研究了如何准确确定各不同接触面上的摩擦角和黏聚力,通过了解系统中各组成部分接触面抗剪强度来研究衬垫系统的稳定性。Qian 等^[5]提出了双楔体分析法,将填埋场分为主动楔体和被动楔体,然后分别对主动楔体和被动楔体进行极限平衡分析,建立平衡方程,求解填埋场的安全系数。但该方法没有考虑底部衬垫界面黏聚力,这对目前常用表面粗糙的土工膜来说,计算所得的安全系数与实际情况会有较大差别。冯世进

收稿日期: 2012-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40972192, No. 51208293); 2012 年度上海大学创新基金(No. SDCX2012042)。

第一作者简介: 高俊丽,女,1978 年生,实验师,博士,主要从事新型土工合成材料在填埋场上的应用方面的研究工作。E-mail: susan_jl@staff.shu.edu.cn

通讯作者: 张孟喜,男,1963 年生,博士后,教授,博士生导师,主要从事新型土工加筋技术及地下结构方面的研究工作。E-mail: mxzhang@shu.edu.cn

等^[6]考虑了垃圾坝和界面强度对填埋场整体稳定性的影响, 得出安全系数随着垃圾坝的高度和底部摩擦角的增加而逐渐增大, 随着衬垫界面摩擦角和黏聚力的增加, 平均安全系数逐渐增加的结论。

在衬垫系统材料设计上, 以往主要是对光面土工膜表面进行加糙以提高界面粗糙度, 如糙面土工膜等。糙面土工膜尽管提高了界面粗糙度, 但由于受生产工艺等因素限制, 其拉伸性能受到一定程度的消减, 且糙面土工膜表面颗粒会因物理磨损或化学侵蚀而脱落, 降低其表面的粗糙程度。本文在传统光面土工膜基础上改变加糙方式, 在光面土工膜上设置条状或块状肋块, 形成立体加肋体系, 即本文提出的加肋土工膜。与传统光面土工膜相比, 加肋土工膜与砂土界面增加了肋块端部所产生的端承阻力和肋块侧面所产生的侧摩阻力。因此, 对加肋土工膜衬垫系统进行稳定性分析时, 有必要对传统的双楔体公式做进一步修正, 建立加肋土工膜衬垫边坡稳定性分析解析解。最后结合实际工程, 分析影响加肋土工膜衬垫系统稳定性的因素。

2 加肋土工膜衬垫系统稳定性计算

由于加肋土工膜-砂土界面与土工格栅-砂土界面较为接近, 本文作者在大量直剪试验结果基础上, 结合现有土工格栅受力机制, 提出加肋土工膜与砂土界面剪切应力主要由三部分组成^[7] (见图1): 土工膜表面和肋块表面与砂土之间的面摩擦应力为 σ_f , 肋块端部的端承阻应力为 σ_p 和肋块侧面的侧摩擦应力为 σ_b 。

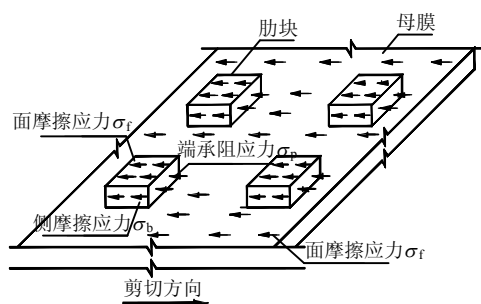


图1 加肋土工膜界面作用机制

Fig.1 Mechanism of reinforced geomembrane interface

若将加肋土工膜与砂土界面的面摩擦力表示为 F_f , 肋块端部所受端承阻力表示为 F_p , 肋块侧面所受侧摩擦力表示为 F_b , 由图1可知, 加肋土工膜与砂土界面剪切力可表示为

$$F = F_f + F_p + F_b \quad (1)$$

在现有国内外文献中, 对面摩擦力 F_f 和侧摩擦力 F_b 的研究已经比较成熟, 可用下式表示:

$$F_f = A_f \sigma_f = A_f \sigma_n f \quad (2)$$

$$F_b = A_b \sigma_b = A_b \sigma_n f \quad (3)$$

式中: A_f 、 A_b 分别为加肋土工膜表面总面积和肋块侧面总面积; f 为界面摩擦系数, 由直剪试验测得; σ_n 为作用在界面上的法向应力。

而对肋块所受端承阻力, 本文在 Irsyam 等^[8]研究基础上, 结合作者所做试验结果和理论研究^[7,9], 认为加肋土工膜界面外一定范围内砂土在法向应力作用下将形成一个加强区, 如图2所示。

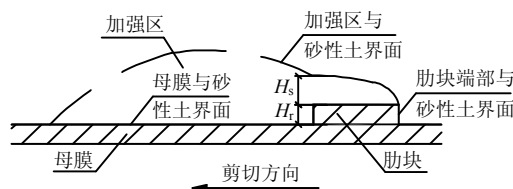


图2 界面分布图

Fig.2 Interface distribution

本文从极限平衡边值问题的角度出发, 分析加肋土工膜上单个肋块所受端承阻应力, 如图3所示。

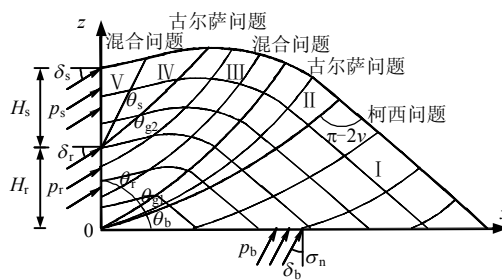


图3 单个肋块端承阻应力分析图^[8]

Fig.3 Analysis of single reinforcement bearing stress^[8]

由文献^[7]可知, 肋块端部所受应力 p_r 为

$$p_r = \sigma_n \frac{\sin \Delta_b \sin(\Delta_r + \delta_r)}{\cos \delta_b \sin(\Delta_b - \delta_b) \sin \Delta_r} \exp \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b - \theta_r \right) \tan \varphi_s \right] \quad (4)$$

式中: δ_b 为母膜与砂土界面的内摩擦角; δ_r 为肋块端部与砂土界面内摩擦角; φ_s 为砂土的内摩擦角。

肋块上方所形成的加强区域端部应力 p_s 为

$$p_s = \sigma_n \frac{\sin \Delta_b \sin(\Delta_s + \delta_s)}{\cos \delta_b \sin(\Delta_b - \delta_b) \sin \Delta_s} \cdot \exp \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b - \theta_s \right) \tan \varphi_s \right] \quad (5)$$

式中: δ_s 为肋块上方所形成的加强区域与砂土界面的内摩擦角。

另有

$$\left. \begin{aligned} \Delta_i &= \sin^{-1} \left[\frac{\sin \delta_i}{\sin \varphi_s} \right] \\ \theta_i &= \left[\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} (-1)^n \varphi_s \right] + \frac{1}{2} (-1)^{n+1} [\Delta_i - \delta_i] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: i 为 r、s、b; 当 i 为 b 时, n 为奇数; 当 i 为 r 或 s 时, n 为偶数。

图 3 中, 单个肋块高度为 H_r , 肋块上加强区域高度为 H_s , 并定义 $H_s = \xi H_r$, 其中 ξ 为经验系数; 肋块长度和宽度分别为 l 和 b 。考虑到在直剪试验过程中, 与肋块接触的砂土会有一个被挤密的作用, 为此对 p_r 乘以修正系数 λ , 于是单个肋块所受端承阻力 F'_p 为

$$F'_p = (\lambda p_r \cos \delta_r + \xi p_s \cos \delta_s) b H_r \quad (7)$$

当填埋场沿衬垫系统发生滑移时, 滑动面是已知的, 本文采用楔形体法计算安全系数, 对加肋土工膜衬垫系统边坡进行了稳定性分析, 其受力分析如图 4 所示。

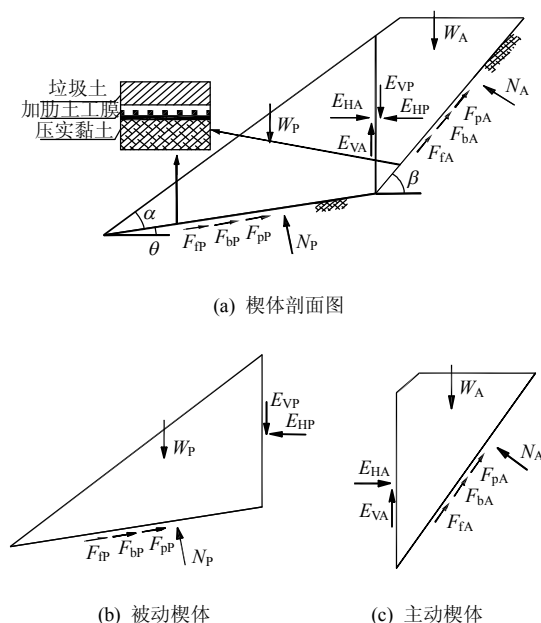


图 4 加肋土工膜衬垫系统受力分析图

Fig.4 Force of reinforced geomembrane liner system

图中 W_A 为主动楔体重量; F_A 、 N_A 分别为背部边坡作用在主动楔体上的切向力和法向力, 其中, F_A 由背部边坡上加肋土工膜界面摩擦阻力 F_{tA} 、肋块端承阻力 F_{pA} 和侧摩阻力 F_{bA} 三部分组成; E_{HA} 、 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。 W_P 为被动楔体重量; F_P 、 N_P 分别为填埋场底部作用在被动楔体上的切向力和法向力, 其中, F_P 由填埋场底部上加肋土工膜界面摩擦阻力 F_{tP} 、肋块端承阻力 F_{pP} 和侧摩阻力 F_{bP} 三部分组成; E_{HP} 、 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。 α 为垃圾体坡角, β 为填埋场主动楔体衬垫系统边坡坡角, θ 为被动楔体衬垫系统边坡坡角。

首先考虑主动楔体上力的平衡, 有

$$\sum F_x = 0, F_A \cos \beta + E_{HA} = N_A \sin \beta \quad (8)$$

$$\sum F_y = 0, W_A = F_A \sin \beta + N_A \cos \beta + E_{VA} \quad (9)$$

取填埋场单位宽度为 L_0 , 假设主动楔体底部长度为 L_1 , 沿衬垫系统长度和宽度方向肋块间距分别为 s 和 s_1 , 母膜边缘无肋块处宽度分别为 s' 和 s'_1 。由式 (1)~(3) 和式 (7) 可知, 背部边坡作用在主动楔体上的切向力 F_A 计算公式为

$$\begin{aligned} F_A &= F_{tA} + F_{bA} + F_{pA} = L_1 L_0 \sigma_n f + \\ &2 \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_1 - s'}{s} + 1 \right) A'_b \sigma_n f + \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \cdot \\ &\left(\frac{L_1 - s'}{s} + 1 \right) (\lambda p_r \cos \delta_r + \xi p_s \cos \delta_s) b H_r \end{aligned} \quad (10)$$

式中: A'_b 为单个肋块侧面面积。

将式 (4) 和式 (5) 代入式 (10) 中, 可得

$$\begin{aligned} F_A &= L_1 L_0 \sigma_n f + 2 \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_1 - s'}{s} + 1 \right) A_p \sigma_n f + \\ &\left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_1 - s'}{s} + 1 \right) b H_r \lambda \cos \delta_r \cdot \\ &\frac{\sin \Delta_b \sin(\Delta_r + \delta_r)}{\cos \delta_b \sin(\Delta_b - \delta_b) \sin \Delta_r} \exp \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b - \theta_r \right) \tan \varphi_s \right] \sigma_n + \\ &\left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_1 - s'}{s} + 1 \right) b H_r \xi \cos \delta_s \cdot \\ &\frac{\sin \Delta_b \sin(\Delta_s + \delta_s)}{\cos \delta_b \sin(\Delta_b - \delta_b) \sin \Delta_s} \exp \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b - \theta_s \right) \tan \varphi_s \right] \sigma_n \end{aligned} \quad (11)$$

令

$$\begin{aligned} \zeta_1 = & L_1 L_0 f + 2 \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_1 - s'}{s} + 1 \right) A_p f + \\ & \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_1 - s'}{s} + 1 \right) b H_r \lambda \cos \delta_r \cdot \\ & \frac{\sin \Delta_b \sin(\Delta_r + \delta_r)}{\cos \delta_b \sin(\Delta_b - \delta_b) \sin \Delta_r} \exp \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b - \theta_r \right) \tan \varphi_s \right] + \\ & \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_1 - s'}{s} + 1 \right) b H_r \xi \cos \delta_s \cdot \\ & \frac{\sin \Delta_b \sin(\Delta_s + \delta_s)}{\cos \delta_b \sin(\Delta_b - \delta_b) \sin \Delta_s} \exp \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b - \theta_s \right) \tan \varphi_s \right] \end{aligned} \quad (12)$$

则式(11)可简化为

$$F_A = \zeta_1 \sigma_n = \zeta_1 \frac{N_A}{L_1 L_0} \quad (13)$$

同时, 由定义可知:

$$E_{VA} = C_w / F_{SV} + E_{HA} \tan \varphi_w / F_{SV} \quad (14)$$

式中: C_w 为主动和被动楔体之间界面上城市固体废弃物的黏结力; F_{SV} 为主动和被动楔体之间的界面安全系数。

将式(13)和式(14)代入式(9), 可得

$$N_A = \frac{L_1 L_0 W_A - L_1 L_0 C_w / F_{SV} - L_1 L_0 E_{HA} \tan \varphi_w / F_{SV}}{L_1 L_0 \cos \beta + \zeta_1 \sin \beta} \quad (15)$$

将式(13)和式(15)代入式(8), 可得

$$\begin{aligned} E_{HA} = & \frac{(W_A - C_w / F_{SV})(L_1 L_0 \sin \beta + \zeta_1 \cos \beta)}{(L_1 L_0 \cos \beta + \zeta_1 \sin \beta) + \tan \varphi_w (L_1 L_0 \sin \beta - \zeta_1 \cos \beta) / F_{SV}} \end{aligned} \quad (16)$$

再考虑被动楔体上力的平衡, 有

$$\sum F_x = 0, F_p \cos \theta = E_{HP} + N_p \sin \theta \quad (17)$$

$$\sum F_y = 0, W_p + E_{VP} = N_p \cos \theta + F_p \sin \theta \quad (18)$$

取填埋场单位宽度 L_0 , 假设被动楔体底部长度为 L_2 , 被动楔体底部摩擦力为

$$\begin{aligned} F_p = & F_{fp} + F_{bp} + F_{pp} = \\ & L_2 L_0 \sigma_n f + 2 \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_2 - s'}{s} + 1 \right) A'_b \sigma_n f + \\ & \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_2 - s'}{s} + 1 \right) (\lambda p_r \cos \delta_r + \xi p_s \cos \delta_s) b H_r \end{aligned} \quad (19)$$

将式(4)和式(5)代入式(19)中, 可得

$$\begin{aligned} F_p = & \left\{ L_2 L_0 f + 2 \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_2 - s'}{s} + 1 \right) A_p f + \right. \\ & \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_2 - s'}{s} + 1 \right) \lambda \frac{\sin \Delta_b \sin(\Delta_r + \delta_r)}{\cos \delta_b \sin(\Delta_b - \delta_b) \sin \Delta_r} \cdot \\ & \exp \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b - \theta_r \right) \tan \varphi_s \right] \cos \delta_r b H_r + \\ & \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_2 - s'}{s} + 1 \right) \xi \frac{\sin \Delta_b \sin(\Delta_s + \delta_s)}{\cos \delta_b \sin(\Delta_b - \delta_b) \sin \Delta_s} \cdot \\ & \left. \exp \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b - \theta_s \right) \tan \varphi_s \right] \cos \delta_s b H_r \right\} \sigma_n \end{aligned} \quad (20)$$

令

$$\begin{aligned} \zeta_2 = & L_2 L_0 f + 2 \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_2 - s'}{s} + 1 \right) A_p f + \\ & \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_2 - s'}{s} + 1 \right) \lambda \frac{\sin \Delta_b \sin(\Delta_r + \delta_r)}{\cos \delta_b \sin(\Delta_b - \delta_b) \sin \Delta_r} \cdot \\ & \exp \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b - \theta_r \right) \tan \varphi_s \right] \cos \delta_r b H_r + \\ & \left(\frac{L_0 - s'_1}{s_1} + 1 \right) \left(\frac{L_2 - s'}{s} + 1 \right) \xi \frac{\sin \Delta_b \sin(\Delta_s + \delta_s)}{\cos \delta_b \sin(\Delta_b - \delta_b) \sin \Delta_s} \cdot \\ & \exp \left[2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b - \theta_s \right) \tan \varphi_s \right] \cos \delta_s b H_r \end{aligned} \quad (21)$$

于是, 式(20)可简化为

$$F_p = \zeta_2 \sigma_n = \zeta_2 \frac{N_p}{L_2 L_0} \quad (22)$$

同样, 由定义可知:

$$E_{VP} = C_w / F_{SV} + E_{HP} \tan \varphi_w / F_{SV} \quad (23)$$

将式(22)和式(23)代入式(18)中, 可得

$$N_p = \frac{W_p + (C_w / F_{SV} + E_{HP} \tan \varphi_w / F_{SV}) - F_p \sin \theta}{\cos \theta} \quad (24)$$

将式(22)和式(24)代入式(17)中, 可得

$$E_{HP} = \frac{W_p \zeta_2 \cos \theta + \zeta_2 \cos \theta C_w / F_{SV} - \sin \theta}{\cos \theta L_2 L_0 - \zeta_2 \cos \theta \tan \varphi_w / F_{SV} - \zeta_2 \sin \theta} \quad (25)$$

本文定义 F_s 为整个填埋场安全系数。从图4可知:

$$F_s = F_{SV} \quad (26)$$

$$E_{HA} = E_{HP} \quad (27)$$

将式(16)、(25)和式(26)代入式(27),可得

$$\left\{ \left[(W_A - C_w / F_s)(L_1 L_0 \sin \beta + \zeta_1 \cos \beta) \right] / \right. \\ \left. [(L_1 L_0 \cos \beta + \zeta_1 \sin \beta) + \tan \varphi_w (L_1 L_0 \sin \beta - \right. \\ \left. \zeta_1 \cos \beta) / F_s \right] \} = \frac{W_p \zeta_2 \cos \theta + \zeta_2 \cos \theta C_w / F_s - \sin \theta}{\cos \theta L_2 L_0 - \zeta_2 \cos \theta \tan \varphi_w / F_s - \zeta_2 \sin \theta} \quad (28)$$

简化式(28)为一元多次方程式,将式(28)中参数代入数据可得不同工况下衬垫边坡安全系数。

3 工程实例及影响因素分析

3.1 工程简介

某填埋场是在老填埋场基础上进行的2期扩建工程,该工程按照我国《生活垃圾卫生填埋技术规范》^[10],将1期工程封场系统作为2期工程的水平防渗系统,同时铺设一层复合衬垫系统。该填埋场相关资料为:垃圾体坡角 $\alpha=7^\circ$,填埋场主动楔体衬垫系统边坡坡角 $\beta=11^\circ$,主动楔体边坡坡长为318 m;被动楔体衬垫系统边坡坡角 $\theta=3^\circ$,被动楔体边坡坡长为225 m^[11]。所用土工膜厚度为1.5 mm,其性能指标见表1。

表1 土工膜性能指标

Table 1 Properties of geomembrane

屈服强度 (N/mm)	断裂强度 (N/mm)	屈服点 伸长率/%	断裂伸 长率/%	直角撕 裂强力/N	穿刺强 力/N	炭黑含 量/%
22	40	12	700	187	480	2.0

由于城市生活垃圾抗剪强度特性较为复杂,参数变化范围大。本文在以往垃圾土研究成果的基础上,结合该填埋场历年来填埋垃圾分析结果和现场钻孔勘察结果^[12-14],取填埋垃圾重度 $\gamma_w=15 \text{ kN/m}^3$,黏聚力 $c_w=5 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi_w=25^\circ$ 。

3.2 沿衬垫边坡失稳破坏分析

按平面应变问题分析该填埋场沿底部衬垫界面失稳破坏。根据双楔体分析法,本文沿填埋场衬垫系统底部拐点进行竖向剖分,将该填埋场划分成引起滑动破坏的主动楔体和阻碍填埋场滑动的被动楔体,如图5所示。已知该填埋场衬垫边坡尺寸和填埋垃圾重度,由计算可知,主动楔体重量 $W_A=141\,105 \text{ kN/m}$,被动楔体重量 $W_P=149\,290 \text{ kN/m}$ 。采用MATLAB软件对式(28)编制程序,计算得

到各种工况下界面安全系数,见表2。从表中可知,加肋后界面安全系数明显提高,安全系数从没有加肋前的安全系数1.05最高提高到1.88,大大改善了界面稳定性。

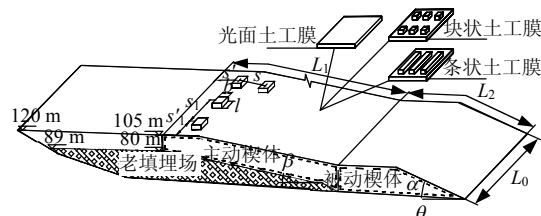


图5 某填埋场双楔体分析

Fig.5 Two wedges analysis model of a landfill

表2 不同加肋土工膜衬垫系统安全系数

Table 2 Safety factor of different reinforced geomembrane liner systems

序号	界面形式	肋块高度 H_r/mm	加肋间距 s/mm	安全系数 F_s
1	光面土工膜-砂土	0		1.05
2	块状土工膜-砂土	1.5		1.07
3	块状土工膜-砂土	1.5	80	1.10
4	块状土工膜-砂土	1.5	60	1.12
5	块状土工膜-砂土	1.5	40	1.15
6	块状土工膜-砂土	3.0		1.09
7	块状土工膜-砂土	3.0	80	1.15
8	块状土工膜-砂土	3.0	60	1.19
9	块状土工膜-砂土	3.0	40	1.26
10	条状土工膜-砂土	1.5		1.16
11	条状土工膜-砂土	1.5	80	1.37
12	条状土工膜-砂土	1.5	60	1.51
13	条状土工膜-砂土	1.5	40	1.88

3.3 衬垫边坡失稳破坏影响因素分析

下面分析肋块形状、肋块高度和加肋间距等因素对填埋场衬垫系统稳定性的影响。当分析某一因素变化对稳定性的影响时,保持其他因素不变,最终评价结果均通过计算所得安全系数来反映。

3.3.1 肋块形状影响

由表2可知,当加肋间距和肋块高度一定时,条状加肋土工膜界面安全系数明显高于块状加肋土工膜界面安全系数。这时因为条状土工膜条状肋块所受端承阻力明显大于块状肋块端承阻力。

3.3.2 肋块高度影响

图6为肋块高度对衬垫系统安全系数的影响。由图可知,当加肋间距较小时,增加肋块高度能较大幅度地提高衬垫系统的安全系数;当加肋间距较大时,如肋块间距达到80 mm,这时增加肋块高度

对衬垫系统安全系数的影响就不大了。这是因为当加肋间距较大时, 肋块上方不能形成很好的挤密区域, 这样其上加强区域高度将受到影响, 从而导致肋块端承阻力值增加程度有限。

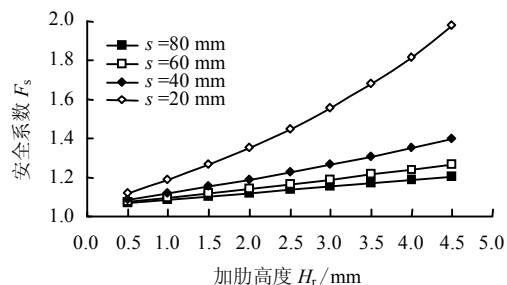
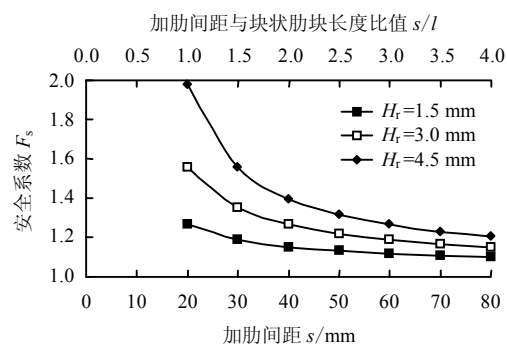


图6 肋块高度对安全系数的影响

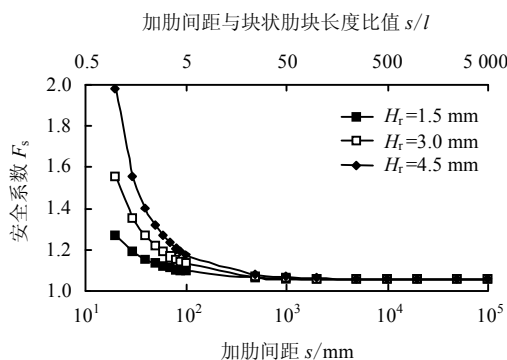
Fig.6 Reinforcement height influence on safety factor

3.3.3 加肋间距影响

图7为加肋间距对衬垫系统安全系数的影响。由图可知, 当肋块高度一定时, 随着加肋间距的增加, 衬垫系统安全系数 F_s 是逐渐减小的。当加肋间距增加到 200 mm 时, 加肋土工膜逐渐失去肋块对界面剪切特性的影响, 接近于光面土工膜的剪切性能。



(a) 笛卡儿坐标



(b) 半对数坐标

图7 加肋间距对安全系数的影响

Fig.7 Reinforcement space influence on safety factor

3.4 垃圾体内部破坏分析

如果衬垫系统内部抗剪强度足够大, 那么填埋场失稳还存在另外一种破坏模式——沿垃圾体内部发生失稳破坏。由于垃圾体是堆放在衬垫边坡倾斜表面的, 垃圾体在自重及外荷载作用下, 部分垃圾将沿着某一潜在滑动面发生剪切滑移。假定垃圾体均匀分布, 通过瑞典条分法可计算出填埋场沿垃圾体内部破坏时的安全系数 $F_s = 1.36$ 。比较填埋场沿衬垫系统失稳破坏和沿垃圾体内部失稳破坏时计算所得的安全系数可知, 本文案例失稳破坏较易发生在衬垫系统内部。

4 结 论

(1) 加肋土工膜衬垫系统安全系数明显高于光面土工膜衬垫系统的安全系数, 且当加肋间距和肋块高度一定时, 条状土工膜比块状土工膜更能提高衬垫系统的安全系数。

(2) 当加肋间距较小时, 肋块高度对安全系数的影响较大; 但当加肋间距增加到 80 mm 以后, 肋块高度对安全系数的影响减弱。

(3) 当肋块高度一定时, 安全系数随着加肋间距的增加而逐渐减小, 当加肋间距增加到 200 mm 时, 加肋土工膜已接近于光面土工膜的剪切特性。

参 考 文 献

- [1] EID H T, STARK T D, EVANS W D. Municipal solid waste slope failure I: Waste and foundation soil properties[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(5): 397—407.
- [2] 刘毓毓, 李琳, 贺怀建. 城市固体废弃物填埋场的岩土工程问题[J]. *岩土力学*, 2002, 23(5): 618—621.
LIU Yu-chuan, LI Lin, HE Huai-jian. Investigation on geotechnical problems of municipal solid waste landfill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 618—621.
- [3] 陈云敏, 王立忠, 胡亚元, 等. 城市固体垃圾填埋场边坡稳定分析[J]. *土木工程学报*, 2001, 23(3): 92—97.
CHEN Yun-min, WANG Li-zhong, HU Ya-yuan, et al. Stability analysis of a solid waste landfill slope[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 23(3): 92—97.
- [4] 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.
- [5] QIAN X D, KOERNER R M, GRAY D H. Translational failure analysis of landfills[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(6): 506

- 519.
- [6] 冯世进, 陈云敏, 高广运, 等. 垃圾坝和界面强度对填埋场沿底部衬垫系统滑动的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 149—155.
FENG Shi-jin, CHEN Yun-min, GAO Guang-yun, et al. Effects of retaining wall and interface strength on transnational failure of landfill along underlying liner system[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(1): 149—155.
- [7] 高俊丽, 张孟喜, 林永亮, 等. 加肋土工膜与砂性土界面相互作用机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 3465—3471.
GAO Jun-li, ZHANG Meng-xi, LIN Yong-liang, et al. Analysis of interaction mechanism of reinforced geomembrane and sandy soil interface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 3465—3471.
- [8] IRSYAM M, HRYCIW R D. Friction and passive resistance in soil reinforced by plane ribbed inclusions[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1991, 41(4): 485—498.
- [9] 高俊丽, 张孟喜, 张文杰. 加肋土工膜与砂土界面特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3225—3230.
GAO Jun-li, ZHANG Meng-xi, ZHANG Wen-jie. Interface property between sand and reinforced geomembrane[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3225—3230.
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. 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.
- [11] 上海市市政工程设计院. 苏州七子山垃圾填埋场扩建工程预可行性研究报告[R]. 上海: 上海市市政工程设计院, 2005.
- [12] 郭亚丽, 赵由才, 徐迪民. 上海老港生活垃圾填埋场陈垃圾的基本特性研究[J]. 上海环境科学报, 2002, 22(11): 669—671.
GUO Ya-li, ZHAO You-cai, XU Di-min. Study on basic characteristics of aged refuse at Shanghai Laogang landfill[J]. **Shanghai Environmental Sciences**, 2002, 22(11): 669—671.
- [13] 朱向荣, 谢新宇, 王朝晖, 等. 杭州天子岭垃圾填埋体土工性状试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 52—58.
ZHU Xiang-rong, XIE Xin-yu, WANG Zhao-hui, et al. An experiment study on the geotechnical behavior of the Tianziling solid waste landfill of Hangzhou[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2004, 37 (10): 52—58.
- [14] 詹良通, 魏海云, 陈云敏, 等. 垃圾原状样的力学压缩性及其与填埋龄期的关系[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42 (2): 353—358.
ZHAN Liang-tong, WEI Hai-yun, CHEN Yun-min, et al. Mechanical compressibility of in-site municipal solid wastes and its relationship to fill ages[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2008, 42(2): 353—358.
- [11] GUNTER G, GSCHWANDTNER, ROBERT GALLER. Input to the application of the convergence confinement method with time-dependent material behaviour of the support[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2012, 12(2): 13—22.
- [12] KYUNG-HO PARK, BITUPORN TONTAVANICH. A simple procedure for ground response curve of circular tunnel in elastic-strain softening rock masses[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2008, 15(5): 151—159.
- [13] HOEK E. Strength of rock and rock masses[J]. **ISRM News Journal**, 1994, 2(2): 4—16.
- [14] 崔希海, 高延法, 范庆忠, 等. 巷道围岩最优恒阻支护计算方法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 674—679.
CUI Xi-hai, GAO Yan-fa, FAN Qing-zhong, et al. Optimum calculating method for constant resistant supporting of roadway surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(5): 674—679.
- [15] WANG SHUILIN, ZHENG HONG, LI CHUNGUANG. A finite element implementation of strain-softening rock mass[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 11(6): 67—76.
- [16] 张传庆, 冯夏庭, 周辉, 等. 应力释放法在隧洞开挖模拟中若干问题的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1174—1181.
ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Study of some problems about application of stress release method to tunnel excavation simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1174—1181.
- [17] CAI M, KAISERA P K, UNOB H, et al. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2007, 44(2): 247—265.
- [18] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion 2002 edition[C]//Proceedings of NARMS-TAC 2002, Mining Innovation and Technology. Toronto: University of Toronto, 2002: 267—273.

上接第 2607 页