

垃圾填埋场封盖土坡系统的地震稳定性

程南军¹, 刘志明², 陈学东³

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省水利工程技术咨询有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要 采用极限平衡法推导了垃圾填埋场封盖土坡系统在渗流作用、地震作用下的安全系数计算公式, 同时给出了屈服加速度的计算方法。不同参数下的封盖土坡系统的地震稳定性分析表明, 浸润面高度显著影响封盖土坡系统的稳定性和屈服加速度。认为在填埋场设计中, 必须高度重视渗流影响, 以保证封盖土坡系统长期有效的设计排水能力。

关键词 渗流; 边坡稳定; 垃圾填埋场; 封盖土坡系统

中图分类号: TV312 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2010)03-0062-03

Seismic stability analysis of landfill cover soil slopes/CHENG Nan-jun¹, LIU Zhi-ming², CHEN Xue-dong³(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Province Hydraulic Engineering Consultant Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: The instability of soil slopes under earthquake load is often related to seepage and the seismic stability analysis of cover soil slopes subjected to seepage has attracted increasing attention in recent years. The procedure for calculating safety factor of cover soil slope with seepage under earthquake load was established in this paper by using the Limit Equilibrium Method (LEM), and the method to calculate yield acceleration was induced. The seismic stability analysis of cover soil slope with different parameters shows that the height of the soakage plane has obvious affect the stability of the cover soil slope and the yield acceleration. The analysis result keeps good agreement to practical case and it is proposed to design an adequate drainage system to decrease the water pressure at the geosynthetic interface.

Key words: seepage; slope stability; landfill; cover systems

土工合成材料衬垫广泛应用于垃圾填埋场, 也应用于交通、水利、岩土等工程领域。土工合成材料系统一般由几层不同的土工合成材料组成, 并有封盖土坡加以保护。但由于封盖土坡系统不稳定而造成的滑动破坏事故经常发生, 其稳定性问题已经逐渐引起研究者关注^[1-3]。在地震活动区域, 封盖土坡系统面临着新的动力稳定性问题, 在地震荷载作用下封盖土坡系统可能会沿着衬垫系统移动并失稳, 在渗流作用下其稳定性问题更显突出^[4-5]。美国针对垃圾填埋场的联邦规范规定: 处在地震区的新建和扩建垃圾填埋场, 设计中必须保证底部衬垫系统、渗滤液收集系统和封盖土坡系统等能够承受地震荷载引起的最大水平加速度。我国到目前为止还未出台相应的规范及标准, 在实际分析中常采用拟静力方法, 可以方便快捷地计算封盖土坡的安全系数^[6-7]。

笔者从拟静力方法出发, 推导出考虑渗流作用

的填埋体封盖土坡系统在地震作用下的安全系数表达式, 给出了屈服加速度的计算方法, 并对安全系数和屈服加速度的计算做了一些分析, 对我国垃圾填埋场封盖土坡系统的稳定性设计具有一定的参考作用。

1 分析模型

依据现行规范, 填埋体封盖土坡系统可以简化成如图 1 所示的几何形状。对于不同的降雨和排水情况, 假定 2 种不同的渗流形式: 第 1 种渗流为水平方向, 相应的浸润高度为 H_w ; 第 2 种渗流平行于坡面, 相应的浸润高度为 h_w 。为了分析方便, 定义 h_w 和土层厚度 h 之比为浸没比 c_x , 定义 H_w 和填埋体垂直高度 H 之比为浸润比 c_s 。若有淤堵, 坡脚渗透性极低, 一般封盖土坡系统的渗流可视为水平方向; 若坡脚渗透性中度降低, 则渗流可视为平行于坡面方向; 若地下水位在坡脚附近, 且接近水平方向, 则

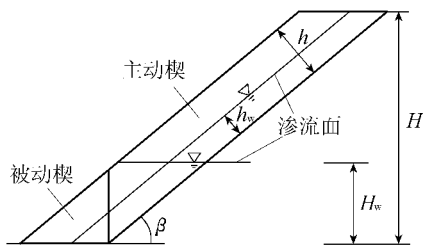


图1 有渗流的封盖土坡剖面

可能上述2种情况并存。

如图1所示,分析中将封盖土坡视为刚性体,根据滑动破坏形式^[1],把滑动部分分为主动楔和被动楔2个楔体,在对各个楔体建立极限平衡方程时,假定条件如下:①填埋体封盖土坡系统的安全系数沿滑动面处处相等;②主动楔和被动楔的合力方向平行于滑动坡面;③由于竖向地震力对安全系数的影响很小^[8],仅考虑水平地震力对边坡的作用和影响。

对于渗流为水平方向的情况,其极限平衡分析如图2所示。分析中将封盖土坡分为主动楔和被动楔2部分。对于主动楔,考虑垂直于土坡方向的静力平衡,可得

$$U_N + N_A + h_A W_A \sin \beta = W_A \cos \beta + U_H \sin \beta \quad (1)$$

考虑土坡方向的静力平衡,可得

$$E_A = h_A W_A \cos \beta + W_A \sin \beta - U_H \cos \beta - \frac{N_A \tan \delta}{F_s} \quad (2)$$

对于被动楔

$$E_P = \frac{(W_P - U_V - h_A W_P) \tan \varphi - U_H F_s}{F_s \cos \beta - \sin \beta \tan \varphi} \quad (3)$$

式中: U_N 为垂直于土坡方向的水压力; N_A 为填埋体对覆盖土层的作用力; h_A 为水平地震系数; W_A 为主动楔的自重; β 为边坡角; E_A 为被动楔对主动楔的作用力; δ 为覆盖土与土工合成材料之间的摩擦角; F_s 为安全系数; E_P 为主动楔对被动楔的作用力; W_P 为被动楔的自重; U_V 为垂直面上的水压力; φ 为覆盖土层的内摩擦角; U_H 为水平面上的水压力。

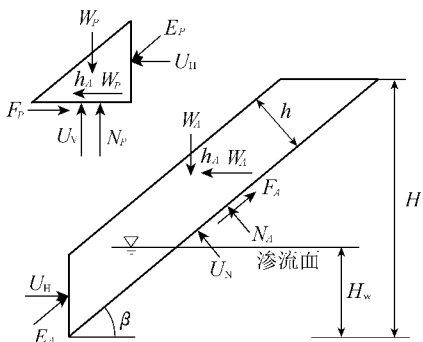


图2 水平方向渗流的封盖土坡极限平衡受力示意图

由于 $E_A = E_P$, 将式(2)代入式(3)可得

$$h_A W_A \cos \beta + W_A \sin \beta - U_H \cos \beta - \frac{N_A \tan \varphi}{F_s} = \frac{(W_P - U_V - h_A W_P) \tan \varphi - U_H F_s}{F_s \cos \beta - \sin \beta \tan \varphi} \quad (4)$$

将式(1)代入式(4)整理可得

$$F_s = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5)$$

其中

$$a = W_A \sin \beta \cos \beta - U_H \cos^2 \beta + h_A W_A \sin \beta \cos \beta + U_H \quad (6)$$

$$b = -(W_A \sin^2 \beta - U_H \sin \beta \cos \beta \tan \varphi + h_A W_A \sin^2 \beta \tan \varphi + N_A \cos \beta \tan \delta + W_P \tan \varphi - U_V \tan \varphi - h_A W_P \tan \varphi) \quad (7)$$

$$c = N_A \sin \beta \tan \varphi \tan \delta \quad (8)$$

$$W_A = \frac{\rho_{\text{sat}} g h (2 H_w \cos \beta - h)}{\sin 2 \beta} + \frac{\rho_{\text{dry}} g h (H - H_w)}{\sin \beta} \quad (9)$$

$$U_N = \frac{\rho_w g h \cos \beta (2 H_w \cos \beta - h)}{\sin 2 \beta} \quad (10)$$

$$U_H = \frac{\rho_w g h^2}{2} \quad (11)$$

$$W_P = \frac{\rho_{\text{sat}} g h^2}{\sin 2 \beta} \quad (12)$$

$$U_V = U_H \tan \beta \quad (13)$$

式中: ρ_{sat} 为饱和土体的密度; ρ_{dry} 为封盖土的干密度; ρ_w 为水的密度; h 为覆盖层的厚度。

对于渗流平行坡面的情况,其极限平衡分析如图3所示。同理可以通过静力平衡方程求解,计算方法同上,计算方程式同式(5),其中参数 W_A , U_N , U_H , W_P 的表达式分别为

$$W_A = \frac{\rho_w g [(h - h_w) 2 H \cos \beta - (h + h_w)] + \rho_{\text{sat}} g h_w (2 H \cos \beta - h_w)}{\sin 2 \beta} \quad (14)$$

$$U_N = \frac{\rho_w g h_w \cos \beta (2 H \cos \beta - h_w)}{\sin 2 \beta} \quad (15)$$

$$U_H = \frac{\rho_w g h_w^2}{2} \quad (16)$$

$$W_P = \frac{\rho_w g (h^2 - h_w^2) + \rho_{\text{sat}} g h_w^2}{\sin 2 \beta} \quad (17)$$

公式(5)即为渗流作用下封盖土坡在地震作用下的安全系数表达式。在水平地震系数已知的情况下可以直接通过以上公式计算安全系数。根据屈服加速度的含义,若封盖土坡的安全系数 $F_s = 1$,此时对应的水平地震系数 h_A 即为屈服加速度 k_y 。

2 参数分析

2.1 渗流作用下的屈服加速度

根据以上计算方法,取填埋结构进行分析,算例

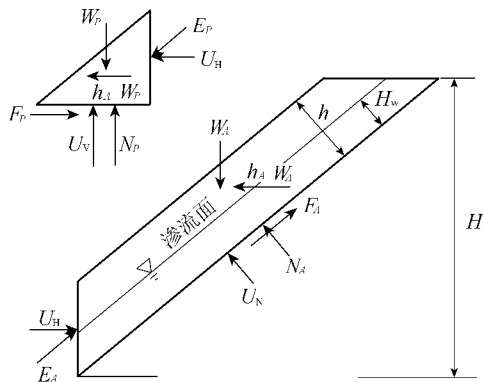


图3 平行于坡面的渗流作用下封盖土坡
极限平衡受力示意图

中的渗流为水平方向,滑动面如图2所示。取封盖土坡厚度为0.90 m,沿坡度方向的垂直高度为10 m,封盖土坡的饱和密度为 $2\,100\text{ kg/m}^3$,干密度为 $1\,800\text{ kg/m}^3$,水的密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$,土体内摩擦角为 40° 。

计算结果如图4所示,随着土-土工膜界面摩擦角的增加,封盖土坡的屈服加速度线性上升,对于某一特定的摩擦角,浸润水面越高,屈服加速度越小(此时边坡角为 18.4°)。边坡角度对屈服加速度的影响见图5,此时土-土工膜界面摩擦角设为 18.4° 。由于边坡角度越小,填埋体的边坡越平缓,稳定性越好,这样计算得到的屈服加速度就会越大,坡脚越大,填埋体越陡峭,稳定性越差,安全系数下降,算出的屈服加速度也就越小,水位越高,其稳定性差,算出的屈服加速度也就越小。所以在实际工程中,对于不满足地震稳定性设计要求的填埋体封盖土坡,要求在土工织物中加筋,以保持稳定的拉力。

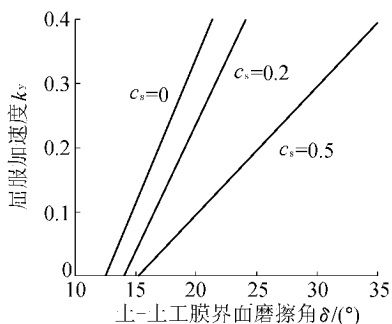


图4 衬垫界面摩擦角和屈服加速度系数的关系

2.2 封盖土坡系统的稳定性

渗流作用下的边坡稳定性计算结果如图6所示(此时填埋体边坡角为 18.4°)。由图6可知,安全系数随着浸润线的提高急剧下降。所以,在实际填埋边坡设计中要考虑到渗流对封盖土坡稳定性的影响,应适当减缓边坡坡度或者提供土工织物加筋力,以保证封盖土坡系统的稳定性。

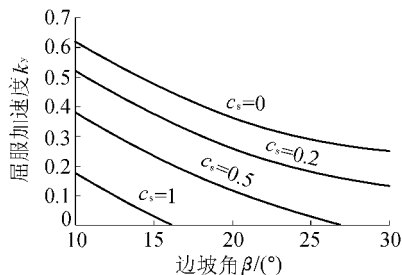


图5 边坡角度和屈服加速度的关系

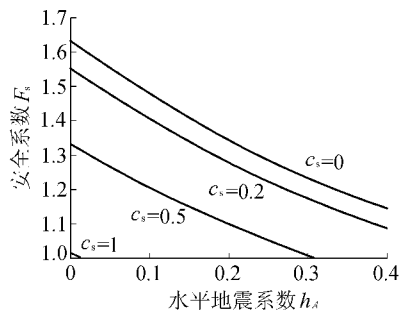


图6 水平地震系数和安全系数的关系

3 结 论

提出了渗流作用下填埋场封盖土坡的极限平衡分析法,考虑了水平地震力的影响,给出了封盖土坡安全系数的计算方法和计算公式。参数分析表明渗流对于封盖土坡的稳定具有不利影响,在填埋场设计计算中必须考虑渗流因素的影响。在设计与施工中可以采用适当减缓填埋体坡度或者提供一定的土工织物加筋力以保证填埋体封盖土坡的稳定性。

参考文献:

- [1] QIAN X D, KOERNER R M, GRAY D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 2001:477-481.
- [2] MITCHELL J K, SEED R B, SEED H B. Kettleman hills waste landfill slope failure I: liner system properties[J]. J Geotech Eng, 1990, 116(4):647-668.
- [3] QIAN Xue-de. Limit equilibrium analysis of translational failure of landfills under different leachate buildup conditions[J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(1):44-62.
- [4] BRAY J D, AUGELLO A J, LEONARDS G A, et al. Seismic stability procedures for solid-waste landfills[J]. J Geotech Eng, 1995, 121(2):139-151.
- [5] 刘君,孔宪京. 卫生填埋场复合边坡地震稳定性和永久变形分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(5):778-782.
- [6] 陈云敏,高登,朱斌,等. 垃圾填埋场沿衬垫界面的地震稳定性及永久位移分析[J]. 中国科学 E 辑:技术科学, 2008, 38(1):79-94.
- [7] 冯世进. 城市固体废弃物静动力特性及填埋场的稳定性分析[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [8] LING H I, LESHCHINSKY D. Seismic stability and permanent displacement of landfill cover systems[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 1997, 123(2):113-122.

(收稿日期:2009-09-27 编辑:骆超)