

DOI: 10.11779/CJGE201406002

# 考虑破坏面转移和垃圾坝作用的边坡稳定分析

施建勇, 雷 省

(河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 垃圾坝是山谷型填埋场和横向扩建填埋场中常采用的增稳措施; 破坏面在衬里结构不同界面间发生转移也是被证实的规律, 考虑破坏面转移和垃圾坝作用的垃圾体边坡稳定分析方法尚未见报道。通过将衬里结构中破坏面转移点作为分界点, 将滑动垃圾体分成 5 个楔体, 利用极限平衡条件建立了五楔体边坡稳定分析方法。研究结果表明, 五楔体极限平衡分析方法能够分析考虑破坏面转移和垃圾坝影响的填埋体稳定性; 考虑破坏面转移计算得到的安全系数低于不考虑考虑破坏面转移的计算结果, 考虑破坏面转移的计算方法能够发现更危险的情况; 填埋场安全系数随垃圾坝高度的增大而增大; 垃圾坝的背坡有一最优坡度, 垃圾坝的背坡小于这一坡度时, 发生“坝背破坏”模式; 垃圾坝的背坡大于这一坡度时, 发生“坝底破坏”模式; 最危险破坏面通过填埋场的背坡和底坡的衬里, 再通过垃圾坝的坝背衬里界面或坝底。

**关键词:** 破坏面转移; 垃圾坝; 边坡稳定分析; 坝背; 坝底

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)06-0998-07

作者简介: 施建勇(1965-), 江苏如皋人, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: soft-ground@hhu.edu.cn。

## Slope stability analysis method considering transfer of sliding failure surface and influence of engineered berm

SHI Jian-yong, LEI Sheng

(Key Laboratory of MOE for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The engineered berm is a general measure to increase the slope stability for valley landfills and the horizontal expansion of existing landfills. The transfer of sliding failure surface between different interfaces in composite liner system has been proved. The slope stability analysis method considering transfer of sliding failure surface and influence of engineered berm is not available. A five-wedge slope stability analysis method is established under the limit equilibrium condition using the failure surface transfer point in liner system as the demarcation and dividing the sliding waste body into five wedges. The research results show that the proposed method can be used to calculate the slope stability of waste filling considering the transfer of sliding failure surface and influence of engineered berm. The safety factor from the new analysis method is less than that without considering the transfer of sliding failure surface. More dangerous state can be found by the new method. The safety factor of slope stability increases with the increasing height of engineered berm. There is an optimum gradient. When the back slope of engineered berm is less than this value, the failure of back slope of the berm occurs. Otherwise the failure under the bottom of the berm happens. The most dangerous failure surface is along the back slope and subgrade slope in the landfill and liner on the back slope of engineered berm or the bottom of the berm.

**Key words:** transfer of failure surface; engineered berm; slope stability analysis; back slope; berm bottom

## 0 前 言

垃圾填埋场边坡稳定分析常采用圆弧滑动法<sup>[1-2]</sup>、楔体极限平衡法<sup>[3-5]</sup>和有限元分析方法<sup>[6]</sup>。由于衬里的影响, 填埋场破坏以平移滑动居多<sup>[7]</sup>, 楔体极限平衡分析法在模拟边坡非圆弧滑动计算时有一定的优势<sup>[3-5]</sup>。现有的楔体极限平衡分析法以双楔体法为基础<sup>[5]</sup>, 考虑渗滤液水位、垃圾坝等影响因素的计算方法已经比较完善<sup>[3-5, 8-9]</sup>。然而, 双楔体法计算发现, 不同的运

行工况下平移破坏的滑动面会在衬里结构的不同界面间转移<sup>[10]</sup>。

Eid<sup>[11]</sup>采用扭剪仪进行了含 GCL 的复合衬垫系统的扭剪试验, 随着法向应力的增加, 剪切破坏面会从无纺布/黏土界面转为有纺布/糙面土工膜界面再到

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172234); 教育部博士点基金(41372268)

收稿日期: 2013-06-16

GCL 内部破坏。Fox 等<sup>[12]</sup>开展了 GCL-糙面 HDPE 膜界面大单剪试验，在法向应力较低时，破坏模式为界面破坏；当法向应力增加时，发生 GCL 内部破坏，甚至会发生部分界面破坏，部分内部破坏。文献[13, 14]的试验发现，在砂、无纺土工布、双向土工网、光面 HDPE 土工膜和压实黏土组合界面中，随着试验法向应力的增加，破坏界面会由一个界面向另一界面转移，且在一定的法向应力范围内还可能同时出现 2 个具有相同剪切强度的极限破坏界面。由此可见，对图 1 所示的平移破坏形式，背坡  $OA$  中间会有一点  $B$ ，在  $AB$  段，衬里界面的法向应力较低，平移破坏时滑动面沿某一破坏面；在  $OB$  段，衬里界面的法向应力较高，滑动面沿另一破坏面。见图 1。

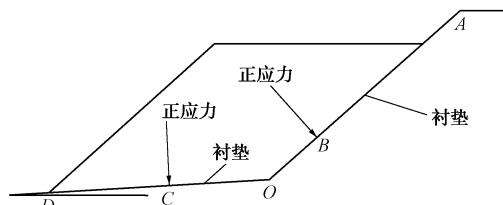


Fig. 1 Sketch of landfill

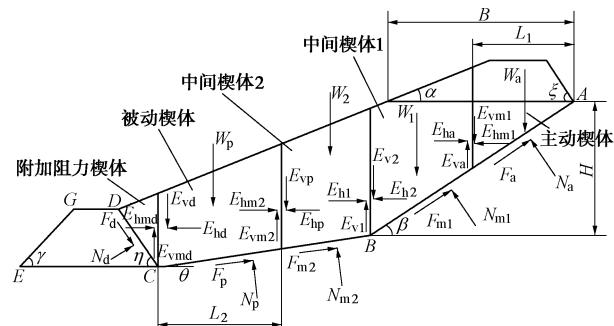
同样，在底坡 $OD$ 上有一点 $C$ ，在 $CD$ 段，衬里界面的法向应力较低，平移破坏时在一破坏面上滑动；在 $OD$ 段，衬里界面的法向应力较高，在另一面上发生滑动。在破坏面发生转移的情况下，背坡和底坡都不再是单一的滑动面，而是分别由2个不同的滑动面组成，不同的滑动面上应选取不同的强度参数，因此原来的双楔体稳定计算方法就不再适用了，需要建立新的分析方法。为此，雷省<sup>[15]</sup>推导了考虑破坏面转移的四楔体稳定分析方法。但是，山谷型垃圾填埋场和横向扩建的垃圾填埋场，经常先建一垃圾坝，以增加填埋体的稳定性。有垃圾坝影响的垃圾填埋场，在考虑破坏面转移影响时，尚没有填埋体稳定分析相应的方法，还需要进行完善。

## 1 考虑破坏面转移与垃圾坝作用的填埋体边坡稳定分析

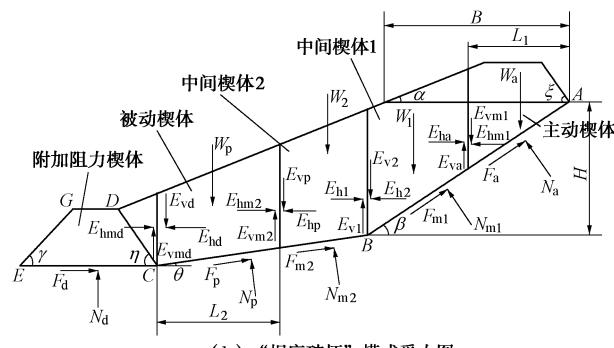
分析时将滑动垃圾体分为5个楔体：主动楔体、2个中间楔体、被动楔体和附加阻力楔体，如图2所示。图2（a）、2（b）分别为“坝背破坏”和“坝底破坏”模式<sup>[9]</sup>。

在图2中，主动、被动楔体衬里处于低法向应力范围，极限破坏面在衬里的某一界面；中间楔体1和中间楔体2衬里处于高法向应力范围，极限破坏面在另一界面。分析时还认为，楔体间的作用力沿深度成三角形分布，合力作用点在距离界面底部 $1/3$ 处，楔体间的合力与楔体界面法向方向成未知角度，合力可分解成：

垂直于楔体间的界面和平行于楔体间的界面；在楔体间界面上满足莫尔-库仑剪切破坏准则，楔体间界面的平均剪应力必须小于垃圾体的平均剪切强度，即要求楔体间的安全系数必须大于等于1；整个填埋场的楔体间安全系数也必须大于等于填埋场的整体安全系数；填埋场的安全系数在破坏面上各点都相同。



(a) “坝背破坏”模式楔体受力图



(b) “坝底破坏”模式受力图

Fig. 2 Force balance on wedge in two failure modes

图2中,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$ 分别为填埋场前坡、背坡和底坡的倾角;  $B$ 和 $H$ 分别为填埋场顶部宽度和填埋高度;  $L_1$ 和 $L_2$ 分别为主动楔体的顶部水平宽度和被动楔体的底部水平宽度。 $W_a$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_p$ ,  $W_d$ 分别为主动、中间楔体1、中间楔体2、被动楔体、附加阻力楔体的重力;  $N_a$ ,  $F_a$ 分别为填埋场背坡作用在主动楔体上的法向力和切向力;  $N_{m1}$ ,  $F_{m1}$ 分别为填埋场背坡作用在中间1楔体上的法向力和切向力;  $N_{m2}$ ,  $F_{m2}$ 分别为填埋场底坡作用在中间楔体2上的法向力和切向力;  $N_p$ 和 $F_p$ 分别为填埋场底坡作用在被动楔体的法向力和切向力; 在“坝背破坏”时,  $N_d$ 和 $F_d$ 分别为垃圾坝背坡作用在附加阻力楔体(垃圾坝背坡上的垃圾体)的法向力和切向力; 在“坝底破坏”时,  $N_d$ 和 $F_d$ 分别为垃圾坝底部作用在附加阻力楔体(垃圾坝背坡上的垃圾体和垃圾坝)的法向力和切向力;  $E_{ha}$ ,  $E_{va}$ 分别为中间楔体1作用在主动楔体上法向力和切向力;  $E_{hm1}$ ,  $E_{vm1}$ 分别为主动楔体作用在中间楔体1上的法向力和切向力;  $E_{hl1}$ ,  $E_{vl1}$ 分别为中间楔体2作用在中间1楔体上的法向力和切向力;  $E_{h2}$ ,  $E_{v2}$ 分别为中间楔体1作用在中间2楔体上的法向力和切向力;  $E_{hm2}$ ,  $E_{vm2}$ 分别为主动楔体作用在中间楔体2上的法向力和切向力;  $E_{hp}$ ,  $E_{vp}$ 分

别为中间楔体2作用在被动楔体上的法向力和切向力;  $E_{\text{hmd}}$ ,  $E_{\text{vmd}}$  分别为附加阻力楔体作用在被动楔体上的法向力和切向力;  $E_{\text{hd}}$ ,  $E_{\text{vd}}$  分别为被动楔体作用在附加阻力楔体上的法向力和切向力。

### 1.1 “坝背破坏”模式安全系数求解

#### (1) 中间楔体1极限平衡分析

根据Y方向力的平衡 ( $\sum F_y = 0$ ) 得

$$W_1 + E_{\text{vml}} = E_{\text{v1}} + F_{\text{m1}} \sin \beta + N_{\text{m1}} \cos \beta, \quad (1)$$

$$F_{\text{m1}} = C_{\text{m1}} / F_{\text{Sm1}} + N_{\text{m1}} \tan \delta_{\text{m1}} / F_{\text{Sm1}}, \quad (2)$$

$$E_{\text{vml}} = n_{\text{sw1}} + E_{\text{hml}} m_{\text{sw}}, \quad (3)$$

$$E_{\text{v1}} = n_{\text{sw3}} + E_{\text{h1}} m_{\text{sw}}. \quad (4)$$

式中  $n_{\text{sw1}} = C_{\text{sw1}} / F_{\text{sv}}$ ;  $n_{\text{sw3}} = C_{\text{sw3}} / F_{\text{sv}}$ ;  $m_{\text{sw}} = \tan \varphi_{\text{sw}} / F_{\text{sv}}$ ;  $F_{\text{sm1}}$  是中间楔体1的安全系数;  $F_{\text{sv}}$  是楔体之间的安全系数;  $C_{\text{m1}}$  是中间楔体1极限破坏面的总黏聚力,  $C_{\text{m1}} = c_{\text{m1}} \times$  相应坡长,  $c_{\text{m1}}$  是中间楔体1极限破坏面的黏聚力;  $\delta_{\text{m1}}$  是中间1楔体极限破坏面的内摩擦角;  $c_{\text{sw}}$  是垃圾土的黏聚力;  $\varphi_{\text{sw}}$  是垃圾土的内摩擦角;  $C_{\text{sw1}}$  是主动楔体和中间楔体1间的总黏聚力,  $C_{\text{sw1}} = c_{\text{sw}} \times$  相应的接触长度;  $C_{\text{sw3}}$  是中间楔体1和中间楔体2间的总黏聚力,  $C_{\text{sw3}} = c_{\text{sw}} \times$  相应的接触长度。

根据X方向力的平衡 ( $\sum F_x = 0$ ) 得

$$F_{\text{m1}} \cos \beta + E_{\text{h1}} = N_{\text{m1}} \sin \beta + E_{\text{hm1}}, \quad (5)$$

将式(2)代入式(5), 得

$$N_{\text{m1}} = \frac{E_{\text{h1}} - E_{\text{hm1}} + C_{\text{m1}} \cos \beta / F_{\text{Sm1}}}{\sin \beta - \cos \beta \tan \delta_{\text{m1}} / F_{\text{Sm1}}}, \quad (6)$$

将式(2)~(4)、(6)代入式(1)得

$$E_{\text{h1}} - E_{\text{hm1}} =$$

$$\frac{(W_1 + n_{\text{sw1}} - n_{\text{sw3}})(\sin \beta - \tan \delta_{\text{m1}} \cos \beta / F_{\text{Sm1}}) - C_{\text{m1}} / F_{\text{Sm1}}}{\tan \delta_{\text{m1}} \sin \beta / F_{\text{Sm1}} + \cos \beta + m_{\text{sw}} \sin \beta - m_{\text{sw}} \cos \beta \tan \delta_{\text{m1}} / F_{\text{Sm1}}}. \quad (7)$$

#### (2) 中间楔体2极限平衡分析

根据Y方向力的平衡 ( $\sum F_y = 0$ ), 可得

$$W_2 + E_{\text{v2}} = E_{\text{vm2}} + F_{\text{m2}} \sin \theta + N_{\text{m2}} \cos \theta, \quad (8)$$

$$F_{\text{m2}} = C_{\text{m2}} / F_{\text{Sm2}} + N_{\text{m2}} \tan \delta_{\text{m2}} / F_{\text{Sm2}}, \quad (9)$$

$$E_{\text{vm2}} = n_{\text{sw2}} + E_{\text{hm2}} m_{\text{sw}}, \quad (10)$$

$$E_{\text{v2}} = n_{\text{sw3}} + E_{\text{h2}} m_{\text{sw}}. \quad (11)$$

式中  $n_{\text{sw2}} = C_{\text{sw2}} / F_{\text{sv}}$ ;  $F_{\text{sm2}}$  是中间楔体2的安全系数;  $C_{\text{m2}}$  是中间楔体2底部极限破坏面的总黏聚力,  $C_{\text{m2}} = c_{\text{m2}} \times$  相应坡长,  $c_{\text{m2}}$  为中间楔体2极限破坏面的黏聚力;  $\delta_{\text{m2}}$  是中间楔体2极限破坏面的内摩擦角;  $C_{\text{sw2}}$  是被动楔体和中间楔体2间的总黏聚力,  $C_{\text{sw2}} = c_{\text{sw}} \times$  相应的接触长度。

根据X方向力的平衡 ( $\sum F_x = 0$ ) 得

$$F_{\text{m2}} \cos \theta + E_{\text{hm2}} = N_{\text{m2}} \sin \theta + E_{\text{h2}}, \quad (12)$$

将式(9)代入式(12), 得

$$N_{\text{m2}} = \frac{E_{\text{h2}} - E_{\text{hm2}} - C_{\text{m2}} \cos \theta / F_{\text{Sm2}}}{\cos \theta \tan \delta_{\text{m2}} / F_{\text{Sm2}} - \sin \theta}. \quad (13)$$

将式(9)~(11)、(13)代入式(8)得

$$E_{\text{h2}} - E_{\text{hm2}} = \frac{(W_p + n_{\text{sw3}} - n_{\text{sw2}})(\tan \delta_{\text{m2}} \cos \theta / F_{\text{Sm2}} - \sin \theta) + C_{\text{m2}} / F_{\text{Sm2}}}{\tan \delta_{\text{m2}} \sin \theta / F_{\text{Sm2}} + \cos \theta + m_{\text{sw}} \sin \theta - m_{\text{sw}} \cos \theta \tan \delta_{\text{m2}} / F_{\text{Sm2}}}. \quad (14)$$

#### (3) 被动楔体极限平衡分析

根据Y方向力的平衡 ( $\sum F_y = 0$ ), 可得

$$W_p + E_{\text{vp}} = E_{\text{vmd}} + F_p \sin \theta + N_p \cos \theta, \quad (15)$$

$$F_p = C_p / F_{\text{Sp}} + N_p \tan \delta_p / F_{\text{Sp}}, \quad (16)$$

$$E_{\text{vp}} = n_{\text{sw2}} + m_{\text{sw}} E_{\text{hp}}, \quad (17)$$

$$E_{\text{vmd}} = n_{\text{sw4}} + m_{\text{sw}} E_{\text{hmd}}. \quad (18)$$

式中  $F_{\text{Sp}}$  是被动楔体的安全系数;  $C_p$  是被动楔体底部极限破坏面的总黏聚力,  $C_p = c_p \times$  相应坡长,  $c_p$  是被动楔体极限破坏面的黏聚力;  $\delta_p$  是被动楔体极限破坏面的内摩擦角。

根据X方向力的平衡 ( $\sum F_x = 0$ ), 可得

$$F_p \cos \theta + E_{\text{h3}} = N_p \sin \theta + E_{\text{hp}}. \quad (19)$$

将式(16)代入式(19), 得

$$N_p = \frac{E_{\text{hp}} - E_{\text{h3}} + C_p \cos \theta / F_{\text{Sp}}}{\cos \theta \tan \delta_p / F_{\text{Sp}} - \sin \theta}. \quad (20)$$

将式(16)~(20)代入式(15)得

$$E_{\text{hp}} - E_{\text{hmd}} = \frac{(W_p + n_{\text{sw2}} - n_{\text{sw4}})(\tan \delta_p \cos \theta / F_{\text{Sp}} - \sin \theta) + C_p / F_{\text{Sp}}}{\cos \theta + \tan \delta_p \sin \theta / F_{\text{Sp}} + m_{\text{sw}} \sin \theta - m_{\text{sw}} \cos \theta \tan \delta_p / F_{\text{Sp}}}. \quad (21)$$

#### (4) 主动楔体极限平衡分析

根据Y方向力的平衡 ( $\sum F_y = 0$ ), 可得

$$W_a = E_{\text{va}} + F_a \sin \beta + N_a \cos \beta, \quad (22)$$

$$F_a = C_a / F_{\text{Sa}} + N_a \tan \delta_a / F_{\text{Sa}}, \quad (23)$$

$$E_{\text{va}} = C_{\text{sw1}} / F_{\text{sv}} + E_{\text{ha}} m_{\text{sw}}. \quad (24)$$

式中  $F_{\text{Sa}}$  是主动楔体的安全系数;  $C_a$  是主动楔体底部极限破坏面的总黏聚力,  $C_a = c_a \times$  相应坡长,  $c_a$  是主动楔体极限破坏面的黏聚力;  $\delta_a$  是主动楔体极限破坏面的内摩擦角。

根据X方向力的平衡 ( $\sum F_x = 0$ ) 得

$$N_a \sin \beta = F_a \cos \beta + E_{\text{ha}}. \quad (25)$$

将式(23)代入式(25), 得

$$N_a = \frac{E_{\text{ha}} + C_a \cos \beta / F_{\text{Sa}}}{\sin \beta - \cos \beta \tan \delta_a / F_{\text{Sa}}}. \quad (26)$$

将式(23)~(26)代入式(22)得

$$E_{\text{ha}} = \frac{(W_a + n_{\text{sw1}})(\sin \beta - \cos \beta \tan \delta_a / F_{\text{Sa}}) - C_a / F_{\text{Sa}}}{\cos \beta + \sin \beta \tan \delta_a / F_{\text{Sa}} + m_{\text{sw}} \sin \beta - m_{\text{sw}} \cos \beta \tan \delta_a / F_{\text{Sa}}}. \quad (27)$$

### (5) 附加阻力楔体极限平衡分析

根据Y方向力的平衡 ( $\sum F_y = 0$ ), 可得

$$W_d + E_{vd} + F_d \sin \eta = N_d \cos \eta , \quad (28)$$

$$F_d = C_d / F_{sd} + N_d \tan \delta_d / F_{sd} , \quad (29)$$

$$E_{vd} = n_{sw4} + m_{sw} E_{hd} . \quad (30)$$

式中  $n_{sw4} = C_{sw4} / F_{sv}$ ;  $F_{sd}$  是附加阻力楔体的安全系数;  $C_d$  是附加阻力楔体底部极限破坏面的总黏聚力,  $C_d = c_d \times$  相应坡长,  $c_d$  是附加阻力楔体极限破坏面的黏聚力;  $\delta_d$  是附加阻力楔体极限破坏面的内摩擦角。

根据X方向力的平衡 ( $\sum F_x = 0$ ), 可得

$$F_d \cos \eta + N_d \sin \eta = E_{hd} . \quad (31)$$

将式(29)代入式(31)得

$$N_d = \frac{E_{hd} - C_d \cos \eta / F_{sd}}{\cos \eta \tan \delta_d / F_{sd} + \sin \eta} . \quad (32)$$

将式(29)~(32)代入式(28)得

$$E_{hd} = \frac{(W_d + n_{sw4})(\cos \eta \tan \delta_d / F_{sd} + \sin \eta) + C_d / F_{sd}}{\cos \eta - \sin \eta \tan \delta_d / F_{sd} - m_{sw} \cos \eta \tan \delta_d / F_{sd} - m_{sw} \sin \eta} . \quad (33)$$

由  $E_{ha} = E_{hm1}$ ,  $E_{va} = E_{vm1}$ ,  $E_{hl} = E_{h2}$ ,  $E_{vl} = E_{v2}$ ,  $E_{hp} = E_{hm2}$ ,  $E_{vp} = E_{vm2}$ ,  $E_{vd} = E_{vmd}$ ,  $E_{hd} = E_{hmd}$ , 并假设  $F_{sa} = F_{sp} = F_{sm1} = F_{sm2} = F_{sd} = F_s$ , 可以化简得到安全系数计算的表达式为

$$A_0 + \frac{B_0}{F_s} + \frac{C_0}{F_s^2} + \frac{D_0}{F_s^3} + \frac{E_0}{F_s^4} + \frac{F_0}{F_s^5} = 0 , \quad (34)$$

式中,  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$ ,  $D_0$ ,  $E_0$ ,  $F_0$  是含有  $F_{sv}$  的系数<sup>[15]</sup>。

### 1.2 “坝底破坏”模式安全系数求解

主动楔体、中间楔体1和2、被动楔体与“坝背破坏”的推导一致, 对附加阻力楔体进行极限平衡分析。

根据Y方向力的平衡 ( $\sum F_y = 0$ ), 可得

$$W_d + E_{vd} = N_d , \quad (35)$$

$$F_d = C_d / F_{sd} + N_d \tan \delta_d / F_{sd} , \quad (36)$$

$$E_{vd} = n_{sw4} + m_{sw} E_{hd} . \quad (37)$$

式中  $n_{sw4} = C_{sw4} / F_{sv}$ ,  $F_{sd}$  是附加阻力楔体的安全系数;  $C_d$  是附加阻力楔体底部极限破坏面的总黏聚力,  $C_d = c_d \times$  相应坡长,  $c_d$  是附加阻力楔体极限破坏面的黏聚力;  $\delta_d$  是附加阻力楔体极限破坏面的内摩擦角。

根据X方向力的平衡 ( $\sum F_x = 0$ ), 可得

$$F_d = E_{hd} , \quad (38)$$

将式(36)代入式(38), 得

$$N_d = \frac{E_{hd} - C_d / F_{sd}}{\tan \delta_d / F_{sd}} . \quad (39)$$

将式(36)~(39)代入式(35)得

$$E_{hd} = \frac{(W_d + n_{sw4}) \tan \delta_d / F_{sd} + C_d / F_{sd}}{1 - m_{sw} \tan \delta_d / F_{sd}} . \quad (40)$$

由  $E_{ha} = E_{hm1}$ ,  $E_{va} = E_{vm1}$ ,  $E_{hl} = E_{h2}$ ,  $E_{vl} = E_{v2}$ ,  $E_{hp} = E_{hm2}$ ,  $E_{vp} = E_{vm2}$ ,  $E_{vd} = E_{vmd}$ ,  $E_{ha} = E_{hmd}$ , 同时假设  $F_{sa} = F_{sp} = F_{sm1} = F_{sm2} = F_{sd} = F_s$ , 化简得到安全系数的表达式为

$$A_0 + \frac{B_0}{F_s} + \frac{C_0}{F_s^2} + \frac{D_0}{F_s^3} + \frac{E_0}{F_s^4} + \frac{F_0}{F_s^5} = 0 , \quad (41)$$

式中,  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$ ,  $D_0$ ,  $E_0$ ,  $F_0$  是含有  $F_{sv}$  的系数<sup>[15]</sup>。

在计算安全系数时, 首先得到最小安全系数  $F_{smin}$  和最大安全系数  $F_{smax}$ , 然后以平均安全系数  $F_{save} = (F_{smin} + F_{smax}) / 2$  代替真实的安全系数  $F_{sture}$ <sup>[5]</sup>。

最小安全系数  $F_{smin}$  的计算: 令  $F_{sv} \rightarrow \infty$ , 即不考虑垃圾土内摩擦及黏聚力, 得下限安全系数  $F_{smin}$ , 此时式(27)、(41)是关于  $F_s$  的5次方程。

最大安全系数  $F_{smax}$  的计算: 当  $F_s < 1$ , 取  $F_{sv} = 1$ , 此时式(27)、(41)是关于  $F_s$  的5次方程。当  $F_s \geq 1$ , 取  $F_{sv} = F_s$ , 此时式(27)、(41)均是关于  $F_s$  的8次方程。

## 2 计算对比分析

### 2.1 与文献[9]计算对比分析

有一个扩容的垃圾填埋场, 在基底  $L=150$  m 处增加一座垃圾坝, 垃圾坝高度  $H_b=30$  m, 顶部宽度  $D_b=5$  m, 如图3所示。

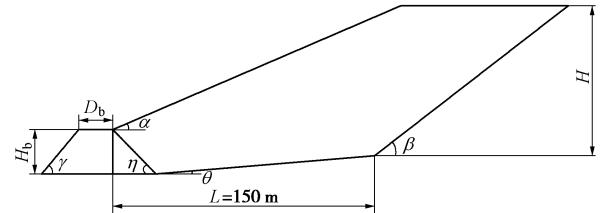


图3 垃圾坝增设示意图

Fig. 3 Sketch of engineered berm

取垃圾土重度  $\gamma_{sw} = 10.2$  kN/m<sup>3</sup>,  $\varphi_{sw} = 30.0^\circ$ ,  $c_{sw} = 3$  kN/m<sup>2</sup>; 垃圾坝填料的重度  $\gamma_{sw} = 18.0$  kN/m<sup>3</sup>; 垃圾填埋场前坡坡度  $\alpha = 1.40^\circ$ ; 背坡坡度  $\beta = 18.4^\circ$ ; 底坡坡度  $\theta = 1.1^\circ$ ; 背坡高度  $H = 80$  m; 垃圾坝前坡坡角  $\gamma_{sw} = 63.4^\circ$ ; 垃圾坝背坡坡角  $\eta = 26.6^\circ$ 。衬里结构选择 GB 16889—2008 规定的单层人工合成材料防渗系统结构<sup>[16]</sup>, 其中的界面强度参数根据试验得到<sup>[17]</sup>, 土工网-土工膜界面内摩擦角  $\delta = 21.8^\circ$ , 土工网-土工膜界面黏聚力  $c = 6.67$  kPa; 土工膜-夯实黏土界面内摩擦角  $\delta = 17.7^\circ$ , 土工膜-夯实黏土界面黏聚力  $c = 22.87$  kPa; 滑动面转移法向应力  $\sigma = 202.2$  kPa。坝底与地基土之间的内摩擦角  $\delta_b = 32^\circ$ ; 坝底与地基土之间的黏聚力  $c_b = 8.0$  kPa。采用文献[9]



表 1 背坡和底坡不同破坏面组合下的安全系数

Table 1 Safety factor under different conditions and failure modes of slope and bottom berm

背坡和底坡极限 破坏面组合	背坡：破坏面转移 底坡：破坏面转移 (五楔体法)	背坡：土工网-土工 膜底坡：土工网-土 工膜 (三楔体法)	背坡：土工膜-夯实 黏土底坡：土工膜- 夯实黏土 (三楔体法)	背坡：土工网-土 工膜底坡：土工膜- 夯实黏土 (三楔体法)	背坡：土工膜-夯 实黏土底坡：土工 网-土工膜 (三楔体法)
坝背破坏	2.61	2.91	2.65	2.78	2.76
坝底破坏	2.52	2.72	2.53	2.63	2.61

中的三楔体法和本文的五楔体法计算对比结果见表 1。

由表 1 可见，在不同的背坡和底坡界面组合中，背坡为土工膜-夯实黏土、底坡为土工膜-夯实黏土时三楔体法计算得到的安全系数最小，这样的界面组合下平移破坏的可能性最大。五楔体法计算得到的安全系数低于三楔体法的计算结果，五楔体法能发现更危险的运行工况，在填埋场的安全控制方面具有重要的指导作用。

## 2.2 垃圾坝坝高对稳定性分析

取垃圾坝坝顶宽度  $D_b = 4$  m，分析坝高对稳定性的影响；垃圾坝背坡坡比 ( $H : V$ ) 分别为 2.0 : 1, 2.5 : 1 时，在“坝背破坏”模式下，计算结果如图 4 所示。

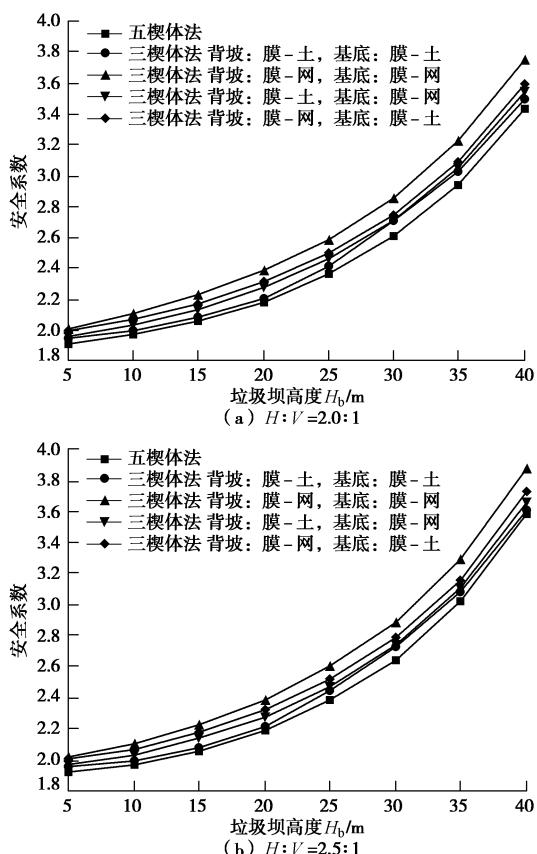


图 4 “坝背破坏”模式下安全系数与垃圾坝高的关系

Fig. 4 Relationship between safety factor and height of engineered berm for failure of back slope

由图 4 可见，填埋场安全系数随垃圾坝高度的增大而增大，考虑衬里破坏面转移效应的稳定安全系数（即五楔体计算结果）小于未考虑破坏面转移效应的稳定安全系数。

图 5 是垃圾坝背坡坡比分别为 2.0 : 1, 2.5 : 1 时，在“坝底破坏”模式下，安全系数分析结果。

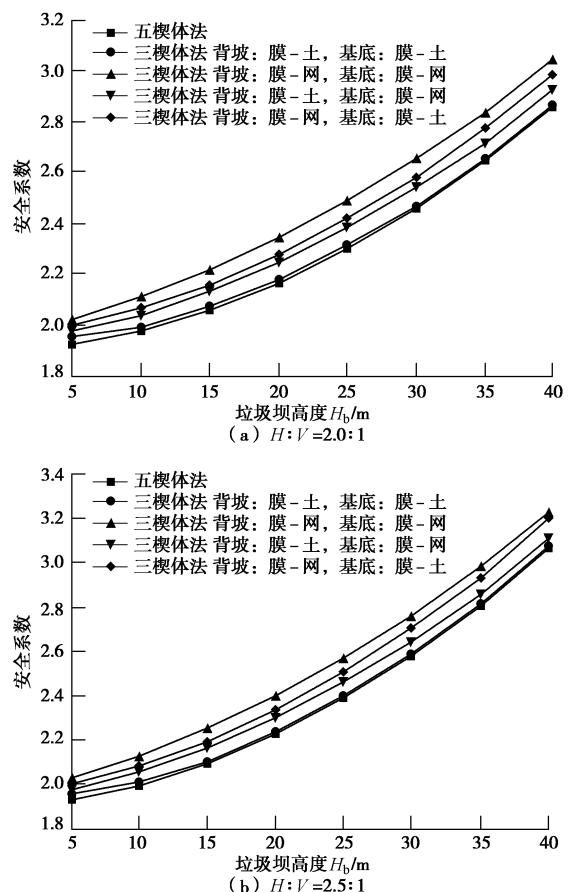


图 5 “坝底破坏”模式下安全系数与垃圾坝高的关系

Fig. 5 Relationship between safety factor and height of engineered berm for failure of bottom

图 5 同样说明了填埋场安全系数随垃圾坝高度的增大而增大，考虑衬垫极限破坏面转移效应计算得到的稳定安全系数小于未考虑极限破坏面转移效应的稳定安全系数。

## 2.3 垃圾坝背坡坡比对稳定性分析

图 6 为 2 种破坏模式下，五楔体法安全系数与垃圾坝背坡坡度的关系。

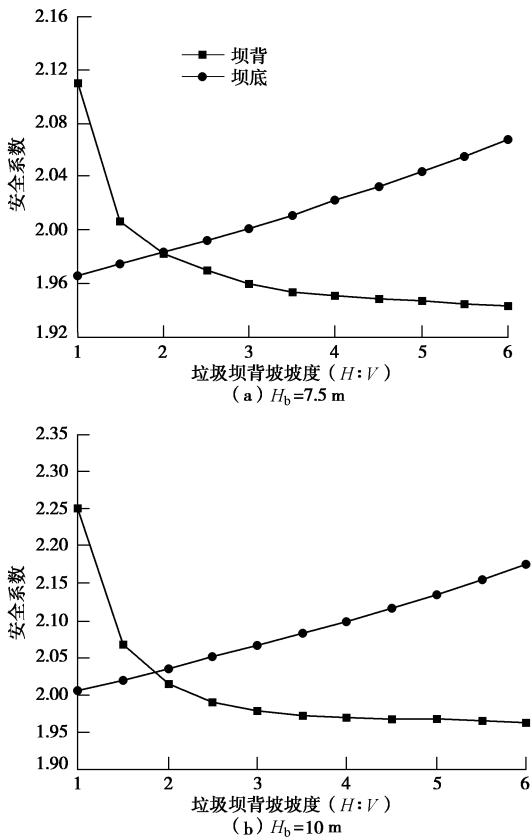


图 6 两种破坏模式下稳定安全系数与垃圾坝背坡坡度的关系  
Fig. 6 Relationship between safety factor and slope of engineered berm in two different failure modes

berm in two different failure modes

由图 6 可见, 当垃圾坝的背坡度小于图中两曲线交点对应的坡度时, “坝背破坏”模式下的安全系数要小于“坝底破坏”模式下的安全系数, 此时最危险破坏面通过填埋场的背坡和底坡衬里, 再通过垃圾坝背坡的衬里; 当垃圾坝的背坡度大于图中两曲线交点对应的坡度时, “坝背破坏”模式下的安全系数要大于“坝底破坏”模式下的安全系数, 此时最危险破坏面通过填埋场的背坡和底坡的衬里, 再通过垃圾坝的底部。从图 6 还可以看出, 在垃圾坝高度分别为 7.5, 10 m 时, 两曲线交点对应的垃圾坝背坡坡度分别为 2.0 : 1, 1.8 : 1; 在交点处, “坝背破坏”模式下的安全系数等于“坝底破坏”模式下的安全系数, 对应的安全系数分别为 1.98, 2.03, 可以发现两曲线交点对应的垃圾坝背坡坡度随垃圾坝高度的增加而增加。理论上, 交点对应的垃圾坝背坡坡度是垃圾坝设计的最优背坡度。

#### 2.4 垃圾坝的抗滑稳定性分析

垃圾坝的抗滑稳定性分析是垃圾坝坝体设计的重要内容, 如图 7 所示的垃圾坝受力分析图。

图 7 中  $W_d$  为垃圾坝的重力;  $N_1$ ,  $F_1$  为填埋体作用于垃圾坝背坡的法向力和切向力, 则  $N_1=N_d$ ,  $F_1=F_d$ ,  $N_d$  和  $F_d$  为“坝背破坏”模式时垃圾坝背破作用于附加阻力楔体的法向力和切向力;  $N_2$ ,  $F_2$  为地基作用于

垃圾坝底部的法向力和切向力,  $N_2$ ,  $F_2$  未知。故先求得未知力  $N_2$ ,  $F_2$ , 再对垃圾坝进行平衡分析。

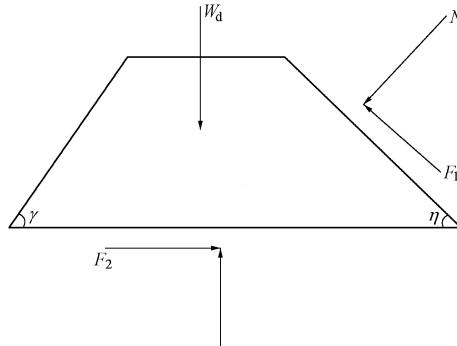


图 7 垃圾坝受力分析图

Fig. 7 Forces on engineered berm

根据  $Y$  方向力的平衡 ( $\sum F_y = 0$ ) 得

$$W_d + N_1 \cos \eta = N_2 + F_1 \sin \eta , \quad (42)$$

可将式 (42) 改写为

$$N_2 = W_d + N_1 \cos \eta - F_1 \sin \eta . \quad (43)$$

根据  $X$  方向力的平衡 ( $\sum F_x = 0$ ) 得

$$F_2 = N_1 \sin \eta + F_1 \cos \eta , \quad (44)$$

则垃圾坝的抗滑稳定安全系数  $F_{\text{slide}}$  为

$$F_{\text{slide}} = \frac{\mu(W_d + N_1 \cos \eta - F_1 \sin \eta)}{N_1 \sin \eta + F_1 \cos \eta} , \quad (45)$$

式中,  $\mu$  为垃圾坝坝底与地基之间的摩擦系数,  $\mu = \tan 32^\circ = 0.62$ 。

由五楔体法, 采用前述基本参数, 垃圾坝的高  $H_b=10 \text{ m}$ , 垃圾坝的背坡度取 1 : 1, 即  $\eta = 45^\circ$ , 则计算可得  $W_d=5040 \text{ kN}$ ,  $N_1=N_d=1538.2 \text{ kN}$ ,  $F_1=F_d=354.78 \text{ kN}$ , 代入式 (45) 可得  $F_{\text{slide}}=2.74$ , 满足抗滑要求。

### 3 结 论

在垃圾填埋场边坡稳定计算分析中, 考虑破坏面转移和垃圾坝的作用, 提出五楔体极限平衡边坡稳定分析方法。通过与三楔体法计算对比, 可以得到以下 5 点结论。

(1) 对有垃圾坝的山谷型填埋场和横向扩建的填埋场, 需要由五楔体极限平衡分析方法计算考虑破坏面转移和垃圾坝影响的填埋体稳定性。

(2) 通过与不考虑考虑破坏面转移的三楔体分析方法计算结果对比分析, 考虑破坏面转移计算得到的安全系数低于不考虑考虑破坏面转移的计算结果, 考虑破坏面转移的计算方法能够发现更危险的情况。

(3) 填埋场安全系数随垃圾坝高度的增大而增大, 考虑衬垫极限破坏面转移效应计算得到的稳定安全系数小于未考虑极限破坏面转移效应的稳定安全系数。

(4) 垃圾坝的背坡坡度小时, 发生“坝背破坏”

模式可能大, 垃圾坝的背坡坡度大时, 发生“坝底破坏”模式的安全系数低, 此时最危险破坏面通过填埋场的背坡和底坡的衬里, 再通过垃圾坝的底部; 垃圾坝背坡坡度有一最优背坡坡度, 此时的“坝背破坏和“坝底破坏”安全系数相等;

(5) 垃圾坝的安全性也能同时得到评估分析。

### 参考文献:

- [1] 陈云敏, 王立忠, 胡亚元, 等. 城市固体垃圾填埋场边坡稳定性分析[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(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, 2000, **33**(3): 92–97. (in Chinese))
- [2] 朱向荣, 王朝晖, 方鹏飞. 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. (ZHU Xiang-rong, WANG Zhao-hui, FANG Peng-fei. Study on feasibility of enlarging capacity in Tianziling waste landfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(3): 281–285. (in Chinese))
- [3] 冯世进, 陈云敏, 高广运. 垃圾填埋场沿底部衬垫系统破坏的稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 20–25. (FENG Shi-jin, CHEN Yun-min, GAO Guang-yun. Analysis on translational failure of landfill along the underlying liner system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 20–25. (in Chinese))
- [4] 涂帆, 崔广强, 林从谋, 等. 垃圾填埋场稳定影响因素敏感性神经网络分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1168–1172. (TU Fan, CUI Guang-qiang, LIN Cong-mou, et al. Sensibility analysis of factors effecting stability of waste landfill based on neural network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1168–1172. (in Chinese))
- [5] QIAN Xue-de, KOERNER R M, GRAY D H. Translational failure analysis of landfills[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, **129**(6): 506–519.
- [6] FILZ G M, ESTERHUIZEN J J B, DUNCAN J M. Progressive failure of lined waste impoundments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, **127**(10): 841–848.
- [7] KOERNER R M, SOONG T Y. Stability assessment of ten large landfill failures (Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics)[J]. Proceedings of Sessions of GeoDenver 2000, ASCE Geotechnical Special Publication, 2000(103): 1–38.
- [8] QIAN Xue-de, KOERNER R M. Effect of apparent cohesion on translational failure analyses of landfills[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2004, **130**(1): 71–80.
- [9] QIAN Xue-de, KOERNER R M. Stability analysis when using an engineered berm to increase landfill space[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(8): 1082–1091.
- [10] 钱学德, 施建勇. 关于具有多层复合衬里填埋场稳定安全的探讨[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(11): 1676–1682. (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, Stability problems for landfills with multilayer geosynthetic liner system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(11): 1676–1682. (in Chinese))
- [11] EID H T. Shear strength of geosynthetic composite systems for design of landfill liner and cover slopes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, **29**(3): 335–344.
- [12] FOX P J, ROSS J D. Relationship between NP GCL internal and HDPE GMX/NP GCL interface shear strengths[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(8): 743–753.
- [13] 施建勇, 钱学德, 朱月兵. 垃圾填埋场复合衬垫剪切特性单剪试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1112–1117. (SHI Jian-yong, QIAN Xue-de, ZHU Yue-bing. Shearing behavior of landfill composite liner by simple shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1112–1117. (in Chinese))
- [14] 钱学德, 施建勇, 刘慧, 等. 垃圾填埋场多层复合衬垫的破坏面特征[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 840–845. (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, LIU Hui, et al. Failure interface behavior of multilayer landfill liner system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 840–845. (in Chinese))
- [15] 雷省. 滑动面转移效应对填埋场平移破坏影响分析[D]. 南京: 河海大学, 2013. (LEI Sheng. Analysis on effects of the shift of the critical interface in liner system on translational failure of landfill[D]. Nanjing: Hohai University, 2013. (in Chinese))
- [16] GB 16889—2008 生活垃圾填埋场污染控制标准[S]. 2008. (GB 16889—2008 Standard for pollution control on the landfill site of municipal solid waste[S]. 2008. (in Chinese))
- [17] 金建成. 复合衬垫中土工网嵌入土工膜对界面摩擦特性影响的试验研究及分析[D]. 南京: 河海大学, 2012. (JIN Jian-cheng. Experimental study and analysis of the interface friction behavior with the geomembrane embedded by the geonet in the composite lining system[D]. Nanjing: Hohai University, 2012. (in Chinese))