

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.014

考虑渗沥液作用的垃圾填埋体组合破坏稳定分析

栾金龙,施建勇

(河海大学教育部岩土力学与堤坝工程重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:现代垃圾填埋场基本采用复合衬里结构,破坏面背坡沿垃圾填埋体内部、底坡沿衬里界面的平移滑动破坏形式成为垃圾填埋体可能的组合破坏形式之一。为了在目前该破坏形式稳定性计算方法的基础上考虑渗沥液的影响,假设穿过垃圾填埋体内部的破坏面为主动破坏面,利用刚体极限平衡分析方法,同时分类讨论渗沥液水位相对于特定界面的不同位置关系,得出每种情况下的计算方法。计算分析结果表明:渗沥液水位升高时,垃圾填埋体的破坏由沿衬里界面的平移滑动破坏演变为穿过垃圾填埋体内部和底部衬里的组合破坏;实际工程算例中,发生破坏失稳正是由于渗沥液水位过高引起的。

关键词: 平移滑动;组合破坏;渗沥液;安全系数;水压力;垃圾填埋场

中图分类号: TU433 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)06-0541-06

Stability analysis of composite failure of waste dumps considering effect of leachate

LUAN Jinlong, SHI Jianyong

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

Abstract: Composite liners are commonly used in modern landfills. The translational slide failure modes, in which the back slope of the failure surface slides along the inside of waste dump and the bottom slope slides along the liner interface, may become one of the composite failure modes. In this study, we considered the effects of leachate based on the methods for stability calculation of such failure modes. We assumed that the failure surface through the inside of the waste dump was an active failure surface. Then, we used the limit equilibrium analysis method and discussed different positional relationships between leachate levels and specific interfaces, in order to obtain the calculation methods for different situations. The results of analysis and calculation show that, when the leachate water levels rose, the failures of waste dumps changed from translational slides along the liner interface to composite failures through the inside of waste dumps and the bottom liner. In practical engineering examples, the failure and instability occurred precisely because the leachate water level was too high.

Key words: translational slide; composite failure; leachate; safety factor; water pressure; landfill

现代城市生活垃圾填埋场,特别是使用多层复合衬里的垃圾填埋场,填埋体失稳破坏的主要形式是由衬里剪切强度控制的平移滑动破坏^[1-2]。垃圾填埋体沿底坡和背坡衬里软弱界面滑动是已得到工程界认同的平移滑动破坏形式。钱学德等^[3-4]利用极限平衡理论先后建立了填埋体双楔体、三楔体平移滑动破坏分析方法;冯世进等^[5]对这一方法进行了发展和完善,同时许多学者也相继研究了复合衬里软弱界面的强度特性^[6-7]。施建勇等^[8]根据垃圾填埋体边坡可能出现的组合破坏形式,即滑动面穿过垃圾填埋体内部和底部衬里界面,推导出考察组合平移滑动破坏的稳定计算公式,得出组合破坏是垃圾填埋体可能破坏形式之一。

的结论,但该方法并没有考虑渗沥液的影响,而垃圾填埋场中渗沥液普遍存在,且是诱发垃圾填埋体失稳破坏的最主要原因。在我国,根据 GB 16889—2008《生活填埋场污染控制标准》^[9] 规定,垃圾填埋场内渗沥液的最大水位应控制在 30 cm 以下。由于一些老垃圾填埋场内没有渗沥液收集和排放系统,或这些系统不能正常运行,或突发高强度降雨等因素均会造成垃圾填埋场内渗沥液水位过高,因此在分析研究垃圾填埋体的稳定性时考虑渗沥液的影响非常必要。本文在文献[8]分析方法的基础上,对垃圾填埋体在渗沥液影响下的组合平移滑动破坏进行分析。

1 考虑渗沥液作用的组合破坏稳定分析方法

1.1 组合破坏楔体的受力分析及渗沥液位置

在图 1 中,五边形 $OQCDE$ 为垃圾填埋体截面示意图^[8]。 α, ξ 分别为填埋体前后坡面与水平面的夹角;坡顶 DE 的长度为 B_T ;背坡 OQ 的高度为 H_0 ,与水平面的夹角为 β_0 ,背坡以上填埋体的高度为 H_T ;底坡 QC 与水平面的夹角为 θ_0 ; B 点为滑动楔体 $ABCDE$ 底坡滑动面的端点,处于底坡 CQ 上。设 $\lambda = L_{BQ}/L_{CQ}$ (L 为长度,下标为线段 2 个端点),过 B 点的水平线与 CD 交于 G ,背坡坡顶到 B 处的高度为 H_s ;填埋体内部主动破坏面 BF 与水平面的夹角为 θ , BF 上受到的总凝聚力为 c_{BF} ,受到的支撑力为 R ;滑动破坏面 AB 上的摩擦角为 φ ,与水平面的夹角为 γ , AB 上受到的凝聚力为 c_{AB} ,受到的主动土压力为 E ;底坡滑动面 BC 上受到的总凝聚力为 c_{BC} 、正压力为 N_p ,摩擦力为 f ; OB 与水平面的夹角为 β ;垃圾填埋体的凝聚力为 c_{sw} ,内摩擦角为 φ_{sw} ,密度为 ρ_{sw} 。不考虑渗沥液影响时滑动楔体 $ABCDE$ 的重力为 W ,破坏楔体 $ABFDE$ 的重力为 W_1 ^[8],考虑渗沥液的影响后,分别变为 $W+\Delta W$ 与 $W_1+\Delta W_1$ 。

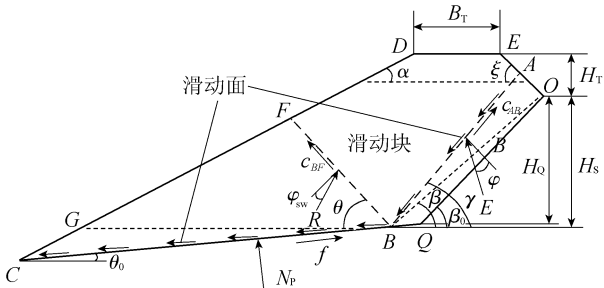


图 1 组合破坏滑动楔体受力示意图
Fig. 1 Sketch of forces on composite failure slip wedge

根据垃圾填埋场内渗沥液的各种分布情况,总结归纳后统一简化为如图 2 所示,背坡水位 PK 平行于背坡,底坡水位 PM 与水平面成 θ_w 角。事实上渗沥液的浸润线既不成直线也不平行于背坡,但上述简化水位假设偏于安全^[3]。若 $\theta_w = 0$,即渗沥液的水面平行于底部的坡度,这是垃圾填埋场正常运行时渗沥液的水位情况;如果 $\theta_w = \theta_0$,即垃圾填埋场内渗沥液的水面在底部是水平的,在背坡面是平行于背坡的,这种情况会发生于一个运行中的垃圾填埋场,前坡已经铺设了部分临时或最终覆盖,而渗沥液抽水泵发生故障或断电的情况。背坡水位线到背坡的竖直距离记为背坡水位 h_{wb} ,底坡上 Q 点到底坡水位线的竖直距离记为底坡水位 h_w ,考虑渗沥液水位的影响时,底坡和背坡上的渗沥液水头通常是不相同的,考虑到背坡比底坡坡度大,排水速度快,可以认为 $h_w \geq h_{wb}$,由渗沥液水头产生的孔隙水压力分别作用于 BF 面、背坡 AB 面和填埋体底部 BC 面,分别被记为 U_1, U_2 和 U_p 。 O 处的水平线、 K 处 PK 的垂线、 P 处 PK 的垂线分别交 AB 于 A', K', P' 。在滑动面 AB 上, $A'K'$ 段受到的水压力计为 U_{21} , $P'K'$ 段受到的水压力计为 U_{22} , BP' 段受到的水压力计为 U_{23} ,则 AB 面受到总水压力 $U_2 = U_{21} + U_{22} + U_{23}$ 。

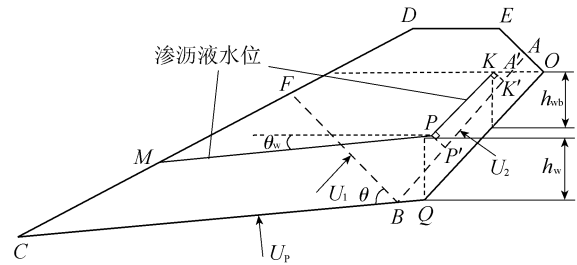


图 2 简化渗沥液水位及水压力示意图
Fig. 2 Sketch of simplified leachate water levels and water pressures

如图 2 所示,在底坡 BC 面上,因底坡渗沥液水位的存在,而使得 BC 面受到的水压力 U_p 的表达式为

$$U_p = \rho_w g \cos^2 \theta_w \left[h_w + \frac{L_{BQ} + L_{CQ}}{2 \cos \theta_w} \sin(\theta_0 - \theta_w) \right] L_{BC}$$

(1)

1.2 滑动面 AB 上渗沥液的作用力和滑动楔体重力的变化

考虑渗沥液作用,要获得与 γ 角对应的滑动面 AB 上渗沥液的作用力 U_2 和滑动楔体重力 W 变化 ΔW 的表达式,需要根据由 γ 角和 λ 确定的 AB 面的位置进行分类, S 表示滑动楔体浸没在渗沥液中的面积。

a. 如图 3(a) 所示,当 AB 面在背坡渗沥液水位 PK 以下时:

$$\begin{cases} U_{21} = 0.5L_{K'A'}L_{KK'}\rho_w g\cos\beta_0 \\ U_{22} = 0.5L_{P'K'}(L_{KK'} + L_{PP'})\rho_w g\cos\beta_0 \\ U_{23} = 0.5L_{BP'}[h_w\cos^2\theta_w + L_{BQ}\sin(\theta_0 - \theta_w) + L_{PP'}\cos\beta_0]\rho_w g \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta W = S[(\rho_{sw}g)_{sat} - \rho_{sw}g] = & \left\{ \left[h_w + \frac{L_{BQ}\sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos\theta_w} \right]^2 \frac{\cos\theta_w\cos\gamma}{2\sin(\gamma - \theta_w)} - \frac{L_{PP'}^2\cos^2(\beta_0 - \gamma)\sin\theta_w}{2\sin\gamma\sin(\gamma - \theta_w)} + \right. \\ & \frac{(L_{PP'} + L_{KK'})\cos(\beta_0 - \gamma)}{2\sin\gamma} \left(H_Q + \frac{h_{wb}\tan\theta_w - h_w\tan\beta_0}{\tan\beta_0 - \tan\theta_w} \right) - \left[h_w + \frac{L_{CQ}\sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos\theta_w} \right]^2 \frac{\cos\theta_w\cos\alpha}{2\sin(\alpha - \theta_w)} + \\ & \left. L_{BC}\cos\theta_0 \left[h_w + \frac{(L_{BQ} + L_{CQ})\sin(\theta_0 - \theta_w)}{2\cos\theta_w} \right] \right\} [(\rho_{sw}g)_{sat} - \rho_{sw}g] \end{aligned} \quad (3)$$

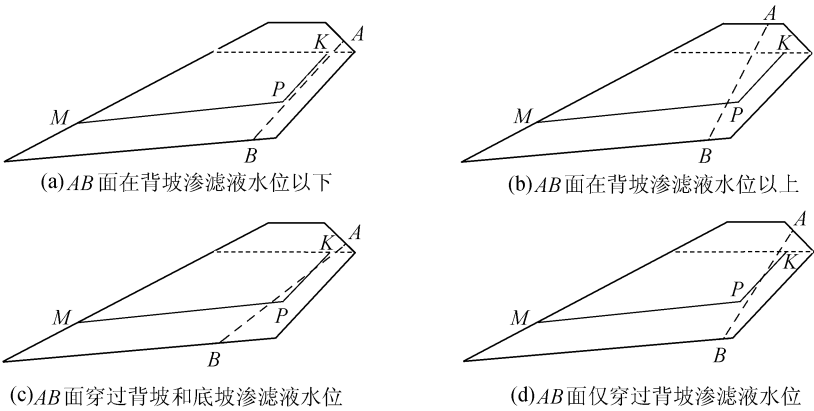


图 3 滑动破坏面与水位线的不同位置关系

Fig. 3 Different locational relationships between failure surface and leachate level

b. 如图 3(b) 所示,当 AB 面在背坡渗沥液水位 PK 以上时:

$$U_2 = U_{21} + U_{22} + U_{23} = 0 + 0 + U_{23} = \frac{\rho_w g \cos^3 \theta_w}{2 \sin(\gamma - \theta_w)} \left[h_w + L_{BQ} \frac{\sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos \theta_w} \right]^2 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta W = S[(\rho_{sw}g)_{sat} - \rho_{sw}g] = & \left\{ \left[h_w + \frac{L_{BQ}\sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos\theta_w} \right]^2 \frac{\cos\theta_w\cos\gamma}{2\sin(\gamma - \theta_w)} + \right. \\ & \left[h_w + \frac{(L_{BQ} + L_{CQ})\sin(\theta_0 - \theta_w)}{2\cos\theta_w} \right] L_{BC}\cos\theta_0 - \\ & \left. \left[h_w + \frac{L_{CQ}\sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos\theta_w} \right]^2 \frac{\cos\theta_w\cos\alpha}{2\sin(\alpha - \theta_w)} \right\} [(\rho_{sw}g)_{sat} - \rho_{sw}g] \end{aligned} \quad (5)$$

该情况下若 AB 面都在底坡水位以下时,如图 4 所示:

$$U_{23} = \left[h_w \cos \theta_w + L_{BQ} \sin(\theta_0 - \theta_w) - \frac{L_{BC} \sin(\alpha - \theta_0)}{2 \sin(\gamma - \alpha)} \sin(\gamma - \theta_w) \right] \frac{L_{BC} \sin(\alpha - \theta_0)}{\sin(\gamma - \alpha)} \rho_w g \cos \theta_w \quad (6)$$

$$\Delta W = W \frac{(\rho_{sw}g)_{sat}}{\rho_{sw}g - 1} \quad (7)$$

c. 如图 3(c) 所示,当 AB 面穿过背坡和底坡渗沥液水位 PK 时:

$$U_{21} = 0.5L_{KK'}\rho_w g\cos\beta_0 \frac{L_{KK'}\sin\beta_0}{\tan(\beta_0 - \gamma)\sin\gamma} \quad U_{22} = 0 \quad U_{23} = \frac{\rho_w g \cos^3 \theta_w}{2 \sin(\gamma - \theta_w)} \left[h_w + L_{BQ} \frac{\sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos \theta_w} \right]^2 \quad (8)$$
$$\begin{aligned} \Delta W = S[(\rho_{sw}g)_{sat} - \rho_{sw}g] = & \left\{ \frac{L_{KK'}\cos(\beta_0 - \gamma)}{2\sin\gamma} \frac{L_{KK'}}{L_{PP'} + L_{KK'}} \left[H_Q + \frac{h_{wb}\tan\theta_w - h_w\tan\beta_0}{\tan\beta_0 - \tan\theta_w} \right] + \right. \\ & \left[h_w + \frac{L_{BQ}\sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos\theta_w} \right]^2 \frac{\cos\theta_w\cos\gamma}{2\sin(\gamma - \theta_w)} + L_{BC}\cos\theta_0 \left[h_w + \frac{(L_{BQ} + L_{CQ})\sin(\theta_0 - \theta_w)}{2\cos\theta_w} \right] - \end{aligned}$$

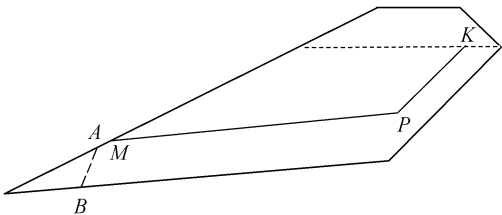


图 4 底坡水位淹没背坡破坏面

Fig. 4 Water level of bottom slope inundates back slope of failure surface

$$\left[h_w + \frac{L_{CQ} \sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos \theta_w} \right]^2 \frac{\cos \theta_w \cos \alpha}{2 \sin(\alpha - \theta_w)} \left\{ (\rho_{sw} g)_{sat} - \rho_{sw} g \right\} \quad (9)$$

d. 如图 3(d) 所示, 当 AB 面仅穿过背坡渗沥液水位 PK 时:

$$\begin{cases} U_{21} = 0 \\ U_{22} = 0.5 L_{PP'} \rho_w g \cos \beta_0 \frac{L_{PP'}}{L_{PP'} + L_{KK'}} L_{P'K'} \\ U_{23} = 0.5 L_{BP'} (h_w \cos^2 \theta_w + L_{BQ} \sin(\theta_0 - \theta_w) + L_{PP'} \cos \beta_0) \rho_w g \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta W = S [(\rho_{sw} g)_{sat} - \rho_{sw} g] = & \left\{ \left[h_w + \frac{L_{BQ} \sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos \theta_w} \right]^2 \frac{\cos \theta_w \cos \gamma}{2 \sin(\gamma - \theta_w)} - \frac{L_{PP'}^2 \cos^2(\beta_0 - \gamma) \sin \theta_w}{2 \sin \gamma \sin(\gamma - \theta_w)} + \right. \\ & L_{BC} \cos \theta_0 \left[h_w + \frac{(L_{BQ} + L_{CQ}) \sin(\theta_0 - \theta_w)}{2 \cos \theta_w} \right] - \left[h_w + \frac{L_{CQ} \sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos \theta_w} \right]^2 \frac{\cos \theta_w \cos \alpha}{2 \sin(\alpha - \theta_w)} + \\ & \left. \frac{L_{PP'} \cos(\beta_0 - \gamma)}{2 \sin \gamma} \frac{L_{PP'}}{L_{PP'} + L_{KK'}} \left[H_Q + \frac{h_{wb} \tan \theta_w - h_w \tan \beta_0}{\tan \beta_0 - \tan \theta_w} \right] \right\} [(\rho_{sw} g)_{sat} - \rho_{sw} g] \end{aligned} \quad (11)$$

1.3 破坏面 BF 上渗沥液的作用力和埋体 ABFDE 重力的变化

要获得与 θ 角对应 BF 面上渗沥液的作用力 U₁ 和埋体 ABFDE 重力 W₁ 变化 ΔW₁ 的表达式, 需要根据由 θ 角确定的 F 点的位置进行分类。

a. 当 F 点在底坡渗沥液水位以下时:

$$U_1 = \left[2 L_{BQ} \sin(\theta_0 - \theta_w) + 2 h_w \cos \theta_w - \frac{L_{BC} \sin(\alpha - \theta_0) \sin(\theta_w + \theta)}{\sin(\alpha + \theta)} \right] \frac{\rho_w g \cos \theta_w L_{BC} \sin(\alpha - \theta_0)}{2 \sin(\alpha + \theta)} \quad (12)$$

$$\Delta W_1 = \Delta W + \frac{L_{BC}^2 \sin(\alpha - \theta_0)}{2 \sin(\alpha + \theta)} \sin(\theta + \theta_0) [\rho_{sw} g - (\rho_{sw} g)_{sat}] \quad (13)$$

b. 当 F 点在底坡渗沥液水位以上时:

$$U_1 = \frac{[L_{BQ} \sin(\theta_0 - \theta_w) + h_w \cos \theta_w]^2}{2 \sin(\theta + \theta_w)} \rho_w g \cos \theta_w \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_1 = \Delta W + & \left\{ L_{BC} \cos \theta_0 \left[h_w + \frac{(L_{BQ} + L_{CQ}) \sin(\theta_0 - \theta_w)}{2 \cos \theta_w} \right] - \left[h_w + \frac{L_{BQ} \sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos \theta_w} \right]^2 \frac{\cos \theta_w \cos \theta}{2 \sin(\theta + \theta_w)} - \right. \\ & \left. \left[h_w + \frac{L_{CQ} \sin(\theta_0 - \theta_w)}{\cos \theta_w} \right]^2 \frac{\cos \theta_w \cos \alpha}{2 \sin(\alpha - \theta_w)} \right\} [\rho_{sw} g - (\rho_{sw} g)_{sat}] \end{aligned} \quad (15)$$

1.4 安全系数的计算及破坏面的确定

W、L_{AB}、L_{ΔAB}、W₁、L_{BF}、L_{ΔBF} 的计算公式参考文献[8], 根据库伦主动土压力理论, 由埋体 ABFDE 的受力平衡, 可得背坡滑动面 AB 上的土压力

$$E(\theta) = \frac{(W_1 + \Delta W_1) \sin(\theta - \varphi_{sw}) + c(L_{AB} + L_{\Delta AB}) \cos(\theta + \gamma - \varphi_{sw}) + U_2 \sin(\varphi_{sw} - \theta - \gamma) + U_1 \sin \varphi_{sw} - c_{sw}(L_{BF} + L_{\Delta BF}) \cos \varphi_{sw}}{\sin(\theta + \gamma - \varphi_{sw} - \varphi)} \quad (16)$$

BF 面上的土压力:

$$R(\theta) = \frac{E(\theta) \sin(\gamma - \varphi) + c_{sw}(L_{BF} + L_{\Delta BF}) \cos \theta - c(L_{AB} + L_{\Delta AB}) \cos \gamma - U_1 \sin \theta + U_2 \sin \gamma}{\sin(\theta - \varphi_{sw})} \quad (17)$$

式中: c、φ——与水平面成 γ 角的滑动面 AB 的凝聚力、摩擦角, 当 AB 面处于埋体内部时, 取为垃圾埋体的凝聚力和摩擦角。当 θ 角从 0° 到 (180° - β) 变动的过程中, 得到 E(θ) 的最大值 E_{max} 即为 AB 面上的主动土压力 E。再运用刚体极限平衡理论^[10] 研究滑动楔体 ABCDE 的受力, 推得 BC 破坏面上的 N_p 与 f 的表达式, 进而可以得到安全系数:

$$\begin{aligned} F_s(\gamma) = & \frac{N_p \tan \varphi_{BC} + c_{BC} L_{BC}}{f} = \\ & \frac{\tan \varphi_{BC} [(W + \Delta W) \cos \theta_0 - E \cos(\gamma - \varphi - \theta_0) - c(L_{AB} + L_{\Delta AB}) \sin(\gamma - \theta_0) - U_2 \cos(\gamma - \theta_0) - U_p] + c_{BC} L_{BC}}{(W + \Delta W) \sin \theta_0 + E \sin(\gamma - \varphi - \theta_0) - c(L_{AB} + L_{\Delta AB}) \cos(\gamma - \theta_0) + U_2 \sin(\gamma - \theta_0)} \end{aligned} \quad (18)$$

当 γ 角在 β 到 90°, 以及 BC 在 O ~ L_{CQ} 长度范围内变动, F_s(γ) 取得最小值 (只在正值范围内考虑) 时, 对应

法在内的多种算法进行边坡稳定性检验。

3 结 论

- a. 破坏面背坡沿垃圾填埋体内部、底坡沿衬里界面的组合破坏是垃圾填埋体可能的破坏形式之一,渗沥液作用下组合破坏的稳定计算方法得到了完善。
- b. 在渗沥液水位较低时滑动破坏发生在衬里界面,而水位较高时破坏面背坡将处于填埋体内部,即破坏面为穿过垃圾填埋体内部和底部衬里的组合破坏面;实际工程稳定分析时,组合破坏也应进行稳定验算。
- c. 通过某固体废弃物填埋场失稳边坡计算分析,结果表明,随着底坡水位的升高,垃圾填埋体背坡滑动面通过填埋体内部的安全系数不断降低,当底坡水位升高到一定范围时,安全系数降低至失稳破坏,渗沥液水位过高是引起实际垃圾填埋场边坡失稳的主要原因之一。

参考文献:

[1] QIAN Xuede, KOERNER R M, GRAY D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall,2002.

[2] KOERNER R M,SOONG T Y. Stability assessment of ten large landfill failuresK[C]// ZORNBERG J C, CHRISTOPHER B R. Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics. Proceedings of Sessions of GeoDenver 2000, Denver, Colorado, United States: ASCE, 2000,Geotechnical Special Publication (GSP) No. 103,2000:1-38.

[3] QIAN X, KOERNER R M, GRAY D H. Translational failure analysis of landfills [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2003,129(6):506-519.

[4] QIAN X,KOERNER R M. Stability analysis when using an engineered berm to increase landfill space[J]. Journal of Gotechnical and Goenvironmental Eginieering,2009,135(8):1082-1091.

[5] 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 Shijin, CHEN Yunmin, GAO Guangyun. Analysis on trandlational failure of landfill along the underlying liner system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(1):20-25. (in Chinese))

[6] 徐超,聊星槌,叶观宝,等. HDPE膜界面摩擦特性的斜板仪试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(8):989-994. (XU Chao,LIAO Xingyue, YE Guanbao, et al. Researches on frictional properties of HDPE geomembrane using tilt table device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(8):989-994. (in Chinese))

[7] 林伟岸. 复合衬垫系统剪力传递、强度特性及安全控制[D]. 杭州:浙江大学,2009.

[8] 施建勇,栾金龙. 垃圾体内部与衬里界面组合破坏稳定分析方法研究[J]. 岩土力学,2013,34(9):2576-2582. (SHI Jianyong, LUAN Jinlong. Stability analysis method for composite failure through base liner and waste filling[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(9):2576-2582. (in Chinese))

[9] GB16889—2008 生活垃圾填埋污染控制标准[S].

[10] 钱家欢. 土力学[M]. 南京:河海大学出版社,1995.

[11] 钱学德,施建勇,刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

[12] 隋艳娥,李慧兰. 鸡冠石污水处理厂南侧滑坡稳定性分析与评价[J]. 煤炭技术,2010,29(3):146-148. (SUI Yane, LI Huilan. Stability analysis and evaluation of southern side landslide for Jiguanshi wastewater treatment factory [J]. Coal Technology, 2010,29(3):146-148. (in Chinese))

[13] 深圳市下坪固体废弃物填埋场边坡安全稳定性分析[R]. 南京:河海大学土木与交通学院岩土工程研究所,2007.

[14] 詹良通,管仁秋,陈云敏,等. 某填埋场垃圾堆体边坡失稳过程监测与反分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(8):1697-1705. (ZHAN Liangtong, GUAN Renqiu, CHEN Yunmin, et al. Monitoring and back analysis of slope failure process at landfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(8):1697-1705. (in Chinese))

[15] CJJ176—2012 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范[S].