

DOI: 10.11779/CJGE201411004

# Kettleman Hills 填埋场三维稳定性极限上限分析

黄茂松<sup>1, 2</sup>, 王浩然<sup>1, 2, 3</sup>, 宁兆轲<sup>1, 2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 上海市城市建设设计研究总院, 上海 200092)

**摘要:** 1988年3月失稳破坏的美国 Kettleman Hills 填埋场是一个典型的复杂“山谷”型填埋场, 众多学者研究表明仅采用二维截面分析难以对该填埋场整体稳定性进行评价。目前 Kettleman Hills 填埋场三维稳定性分析多采用极限平衡法, 但是由于极限平衡法对破坏模式没有严格的要求(如速度相容), 无法确定其所得到的解是偏于安全还是偏于危险, 甚至不能确定该破坏模式是否合理。因此本文基于极限分析上限法, 构造二维、拟三维及三维破坏机构进行分析, 并通过与已有的文献及数值模拟结果进行对比验证方法的合理性及有效性。分析表明, 二维和拟三维破坏机构类似, 构建容易计算方便, 适用于填埋场初步快速分析。而三维多个块体破坏机构构建复杂, 计算量大, 但能够反映实际填埋场的破坏情况, 适用于填埋场的详细稳定性分析。

**关键词:** Kettleman Hills 填埋场; 三维; 稳定性; 极限上限分析; 数值模拟

中图分类号: TU91

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)11-1994-08

**作者简介:** 黄茂松(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程方面的科研和教学工作。E-mail: mshuang@tongji.edu.cn。

## Three-dimensional stability of Kettleman Hills landfill based on upper-bound limit analysis method

HUANG Mao-song<sup>1, 2</sup>, WANG Hao-ran<sup>1, 2, 3</sup>, NING Zhao-ke<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Design

& Research Institute, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The Kettleman Hills landfill, which had a slope-stability failure in March 1988, is a typical complex ("Valley" type) landfill, and the two-dimensional analysis is difficult to evaluate its stability. At present, the limit equilibrium method is mostly adopted in the three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill. However, since the conduction of the failure mode does not need to satisfy the strict conditions (kinematically admissible), it is unable to identify whether the results are safe or risky, and even whether the failure mode is reasonable. Thus, based on the upper-bound limit analysis method, the two-dimensional, quasi-three-dimensional and three-dimensional failure mechanisms are conducted and verified through the comparisons with the results of the existing literatures and numerical simulations. The two-dimensional and quasi-three-dimensional failure mechanisms are similar and easy to conduct, so they are convenient for rapid preliminary stability analysis of the landfill. The three-dimensional multiple-block failure mechanism is difficult to conduct and needs large computation, but it can reflect the actual destruction of the landfill and is suitable for a detailed analysis of the landfill.

**Key words:** Kettleman Hills landfill; three-dimension; stability; upper-bound limit analysis; numerical simulation

## 0 引言

固废填埋场是目前最通用和有效处理固体废弃物的方法。衬垫系统能够防护固体废弃物对环境的影响, 在固废填埋场中被广泛的应用。但是衬垫和覆盖物为黏性土、土工合成材料, 以及它们的组合物等, 这些防护材料的界面抗剪强度小于垃圾体本身的抗剪强度, 很容易在防护系统和固废体之间形成滑动面, 所

以衬垫在防护废物的同时, 也增加了填埋场失稳和变形的可能性。Koerner等<sup>[1]</sup>统计了国际上多个填埋场工程实例的失稳破坏形式, 发现其中70%的填埋场都是沿着衬垫界面发生滑动破坏。一旦填埋场发生失稳破

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题项目  
(2012CB719803)

收稿日期: 2014-02-24

坏,除了造成人员伤亡外,由于失稳引起的固废扩散、渗沥液泄漏、废气排放,会严重污染周围环境。因此,无论填埋场规模大小,其稳定性均是设计、施工、运营和封闭后考虑的最重要的因素,对填埋场进行稳定性分析,尤其是考虑衬垫系统软弱界面的影响具有重大的意义。

在固废填埋场的稳定性研究中,目前多是通过假设填埋体沿着衬垫界面滑动来考虑衬垫系统对填埋场稳定性的影响。Qian等<sup>[2]</sup>提出双楔体分析法,将填埋体分为主动楔体和被动楔体两部分对填埋场进行固体废物沿衬垫接触面滑动的稳定性评价。钱学德等<sup>[3]</sup>则将双楔体分析法用于多层复合衬垫系统的填埋场稳定性研究。冯世进等<sup>[4]</sup>将填埋场分为主动楔体、被动楔体和垃圾坝三部分,探讨填埋场沿底部衬垫系统破坏的稳定性。

以上这些研究都是基于二维层面上进行的,但是二维的平面应变假设并不能反应实际的填埋场情况,特别是对于“山谷”型填埋场,更是难以将其等效为一个平面应变问题进行分析,而应该采用三维的整体稳定性分析。例如美国Kettleman Hills填埋场就是一个“山谷”型填埋场(如图1所示),自从1988年3月该填埋场失稳破坏以来,众多学者就将目光放在了在这个填埋场失稳实例上。Seed等<sup>[5]</sup>、Stark等<sup>[6]</sup>、Chang<sup>[7]</sup>等采用二维、拟三维及三维极限平衡法对该实例进行分析研究,研究也表明三维分析结果最接近实际破坏情况,最为合理。



图 1 Kettleman Hills 填埋场鸟瞰图 (Seed 等<sup>[5]</sup>)

Fig. 1 Aerial view of Kettleman Hills landfill

目前在填埋场二维稳定性分析中极限平衡法、极限分析法以及弹塑性有限元法都被广泛的采用,但是在三维稳定性分析上大都基于极限平衡法或弹塑性有限元法,甚少学者采用极限分析法进行研究。这是因为极限分析法在破坏模式构建上有严格的要求,例如极限分析上限法要求构建一个运动许可的破坏机构(即速度相容)并满足关联流动法则,使得极限分析三维破坏机构非常难以构建,特别是形状很不规则的“山谷”型填埋场。但也正是因为极限分析法的这些严格要求,使其能够提供一个精确的上限解,而被广

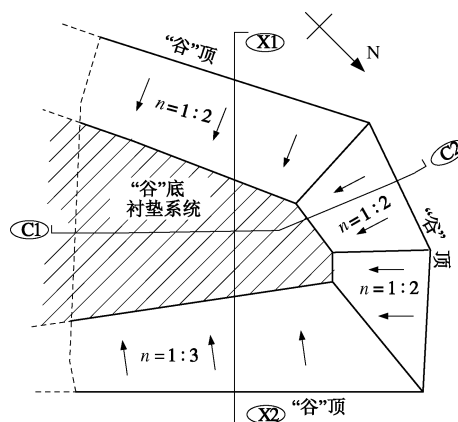
泛认可。本文旨在构建三维极限分析破坏机构,对“山谷”型填埋场的稳定性研究进行探索及尝试。

前文提到众多学者都对Kettleman Hills填埋场实例进行分析对比,也就使得该填埋场实例成为了一个所谓的“标准”算例。在填埋场稳定性分析研究中,一个新的研究方法或分析手段的提出,都最好或应该对此“标准”算例进行分析,并通过对比较验证方法的有效性及其合理性。因此本文依托Kettleman Hills填埋场工程实例,对二维、拟三维及三维极限分析破坏机构的构建进行详细阐述,并将分析结果与已有的文献及数值模拟结果进行对比验证。

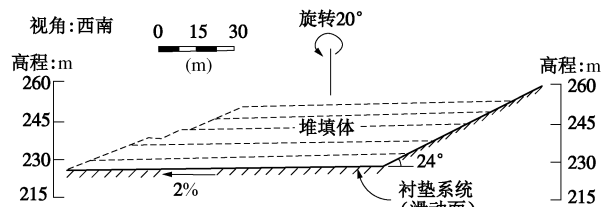
## 1 Kettleman Hills 填埋场工程概况

### 1.1 工程概况

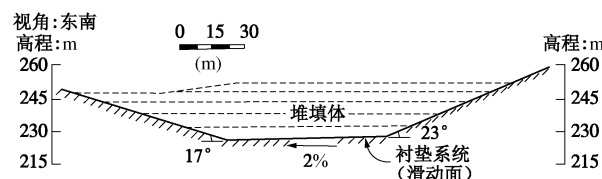
Kettleman Hills填埋场(B-19填埋场)位于美国加利福尼亚州Kettleman城市郊区,是一个I类危险废弃物填埋场<sup>[8]</sup>。该填埋场占地约为3600 m<sup>2</sup>,如图2所示,填埋场底部近乎水平,侧壁坡度为1:2或1:3,其内堆填垃圾高度约为27.4 m (90 ft),是一个典型的“山谷”型填埋场。为了防止有害物质侵入周边土壤,在填埋场底部及侧面均铺设了由黏性土、土工合成材料等组成的衬垫系统。



(a) Kettleman Hills 填埋场地基坡度示意图



(a) Kettleman Hills 填埋场C截面示意图



(c) Kettleman Hills 填埋场X截面示意图

图 2 Kettleman Hills 填埋场尺寸示意图 (Seed 等<sup>[5]</sup>)

Fig. 2 Schematic illustration of Kettleman Hills landfill

1988 年 3 月 19 日, 该填埋场发生了失稳破坏, 垃圾体表面最大水平位移达到 10.7 m (35 ft), 最大竖向位移也有 4.3 m (14 ft), 可以明显的观测到堆填体表面的裂缝以及破坏后暴露出来的部分衬垫系统的撕裂。通过对事故现场的观测及分析研究表明, 事故主要是由填埋场衬垫系统抗剪强度较低, 而导致整个堆填体沿着衬垫界面发生滑动破坏 (Seed 等<sup>[5]</sup>)。

## 1.2 计算参数确定

该填埋场衬垫系统由黏性土、土工合成材料等土工材料分层铺填而成, 事故发生时, 填埋体内水位较低仅浸湿了衬垫系统, 现场实测发现填埋体滑裂面位于第二黏土层和土工膜 (HDPE) 的交界面。Chang<sup>[7]</sup>通过总结前人的研究指出该填埋场衬垫系统在很小位移 (0.5~1.5 mm) 情况下就能达到峰值强度 (如图 3), 一旦该强度被克服, 整个衬垫系统的抗剪强度就会迅速下降到残余强度, 且强度不再随位移发生变化。而在填埋场堆填过程中就很容易使得衬垫系统的位移超过其峰值强度所需的位移, 因此在对一个已经填筑完成的填埋场做整体稳定性分析时应采用衬垫系统的残余强度进行研究。表 1 为各学者通过试验测得该填埋场衬垫系统的强度参数, 从表中可以看出衬垫界面强度总体较低。与 Chang 等<sup>[7]</sup>分析时取的强度参数一样, 在本文 Kettleman Hills 填埋场分析中衬垫系统界面摩擦角也取为  $8^\circ$ , 黏聚力为 0 kPa。

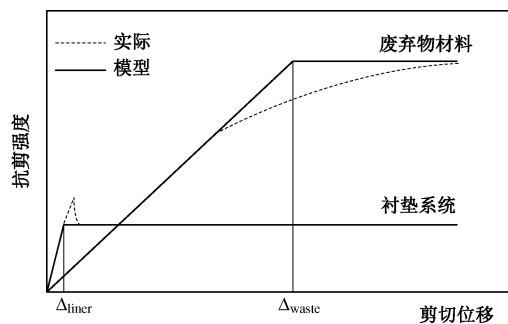


图 3 抗剪强度与剪切位移的关系

Fig. 3 Relationship between shear strength and displacement

表 1 衬垫系统强度参数

Table 1 Parameters of liner system

来源	强度参数 ( $\phi_p$ —峰值强度, $\phi_r$ —残余强度)
Seed 等 <sup>[5]</sup>	$\phi_r = 8.5^\circ$ (侧壁衬垫), $\phi_r = 8^\circ$ (底部衬垫)
Byrne 等 <sup>[9]</sup>	$\phi_p = 12^\circ$ , $\phi_r = 8^\circ$
Stark 等 <sup>[6]</sup>	$\phi_p \approx 8.3^\circ$ , $\phi_r \approx 5.9^\circ$

通过现场实测得到填埋场废弃物堆填体材料的天然重度为 17.3 kN/m<sup>3</sup><sup>[7]</sup>。Singh 等<sup>[10]</sup>研究表明废弃物堆填体材料强度变化很大, 从纯黏性类型 (30~100 kPa) 到纯摩擦类型 ( $\phi = 26^\circ \sim 38^\circ$ ) 的情况都有。根据

Chang<sup>[7]</sup>, 在本文分析中假设废弃物堆填体材料类似于松砂, 其摩擦角为  $30^\circ$ , 黏聚力为 0 kPa。

## 2 二维截面稳定性分析

如图 4 所示, 选取 6 个代表性截面进行稳定性分析, 每个截面的二维尺寸如图 5 所示 (为了能更好地与 Seed 等<sup>[5]</sup>结果进行对比, 截面 A1/A2, C1/C2, D1/D2, E1/E2 并非为一条直线, 而是条折线)。根据堆填体所处的位置可以将其划分为滑动块体 (位于侧面衬垫系统上) 和抗滑块体 (位于底部衬垫系统上)。可以注意到图 5 (b)、(c) 和 (d) 中 XX 和 YY 之间的抗滑块体部分越来越小, 表明抗滑能力也越来越弱, 截面 F1/F2 甚至没有明显的抗滑块体 (图 5 (f))。

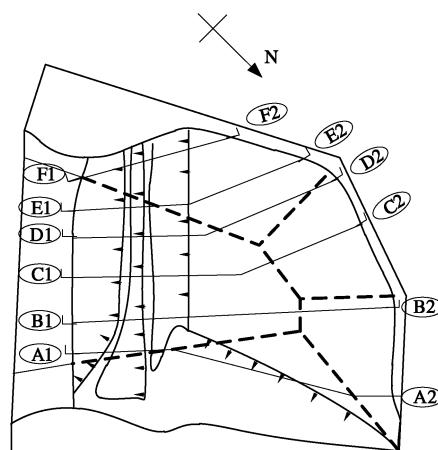
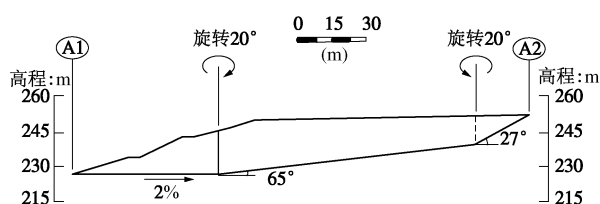
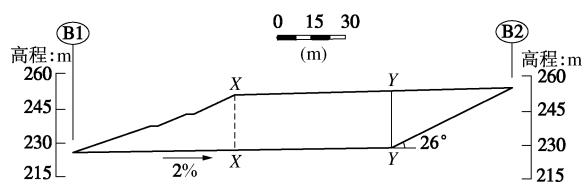


图 4 截面 A1/A2 到 F1/F2 位置示意图

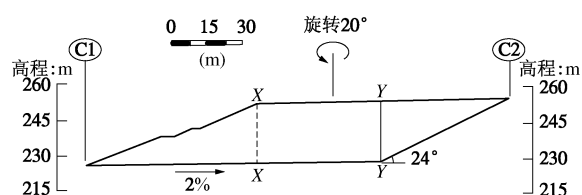
Fig. 4 Location of cross sections A1/A2 through F1/F2



(a) A1/A2截面



(b) B1/B2截面



(c) C1/C2截面

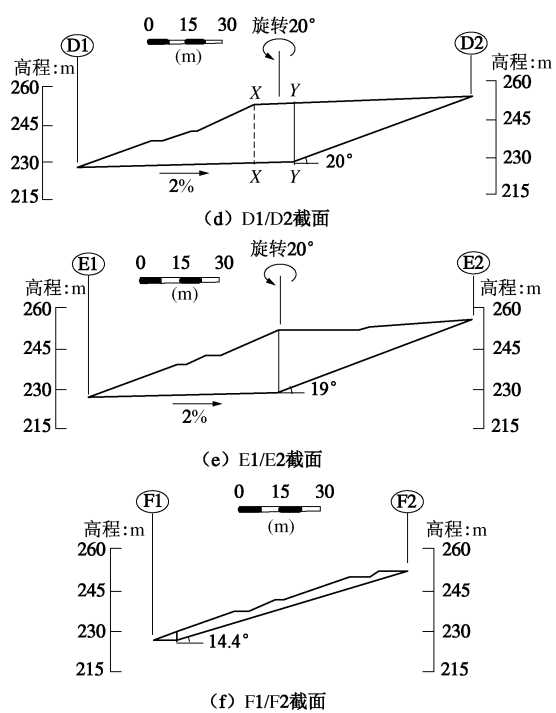


图 5 各截面二维示意图

Fig. 5 2D schematic illustration of sections A1/A2 through F1/F2

图 6 为二维极限分析上限法的破坏机构, 如图所示, 填埋体划分为滑动块体  $a$  和抗滑块体  $b$ 。按照关联流动法则, 在间断面  $DF$  上滑动面相对速度方向与速度间断面夹角为  $\varphi_1$ , 在间断面  $ED$  上夹角为  $\delta_{p1}$ , 而在间断面  $CD$  上夹角为  $\delta_{p2}$ 。通过速度相容关系推导转动块体及间断面上的速度。假设块体  $b$  的速度为  $v_b$ , 如图 7 所示, 块体  $a$  的速度  $v_a = v_b \frac{\cos(\varphi_1 + \delta_{p2} - \delta)}{\cos(\eta - \delta_{p1} - \varphi_1)}$ ,

在间断面  $DF$  上的块体相对速度  $v_r = \frac{\sin(\eta - \delta_{p1} + \delta_{p2} - \delta)}{\cos(\eta - \delta_{p1} - \varphi_1)} v_b$ 。

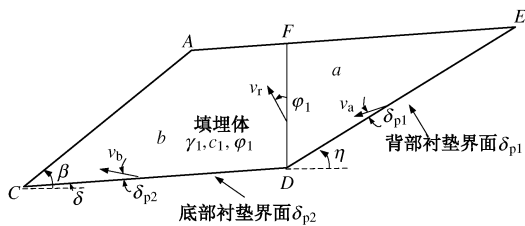


图 6 二维极限分析法破坏机构示意图

Fig. 6 2D failure mechanism

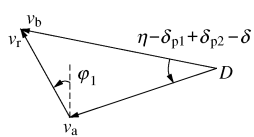


图 7 点 D 处的速度矢量图

Fig. 7 Velocity hodograph at point D

根据极限分析上限法, 当填埋场边坡处于极限平衡状态时, 外力所做的功率  $E$  应等于内能耗散  $D$ 。在

正常条件下, 外力所做的功率就等于重力所做的功率, 即  $E = E_w = \int_V \gamma_i v_i dV$ 。而填埋场内部系统的能量耗散均发生在速度间断面上, 即  $D = \int_S c_i v_i dS$ 。引入强度折减技术来计算边坡的稳定安全系数, 具体过程如图 8 所示。在本文分析中取折减系数  $F_i = \sqrt{\Delta} \cdot F_{i-1}$  对填埋场边坡进行反复计算, 能很快达到极限平衡状态的要求。

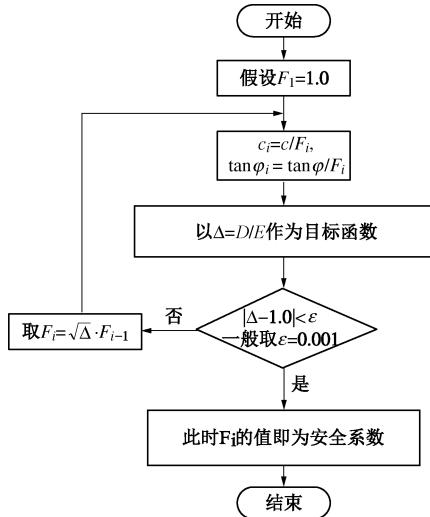


图 8 安全系数计算流程图

Fig. 8 Flow chart for computing safety factor

图 9 为各截面计算得到的安全系数, 图 9 中可以看出从东北方到西南方 (从截面 A1/A2 到 F1/F2), 截面的安全系数逐渐减小。填埋场东北方的截面 (截面 A1/A2) 安全系数最大, 中部 (从截面 C1/C2 到 D1/D2), 两个截面的安全系数接近于 1.0, 而位于西南方的两个截面 (E1/E2 和 F1/F2), 安全系数略小于 1.0。虽然获得了代表截面的安全系数, 但是这些截面的安全系数有的大于 1.0, 有的小于 1.0, 难以对填埋场整体稳定性进行评价 (若都大于 1.0, 则可认为填埋场是稳定的; 若都小于 1.0, 则可认为是不稳定的)。从分析结果来看, 只能知道该填埋场西南方不稳定, 而东北方稳定, 若填埋场发生失稳破坏则应该是先从西南方开始。

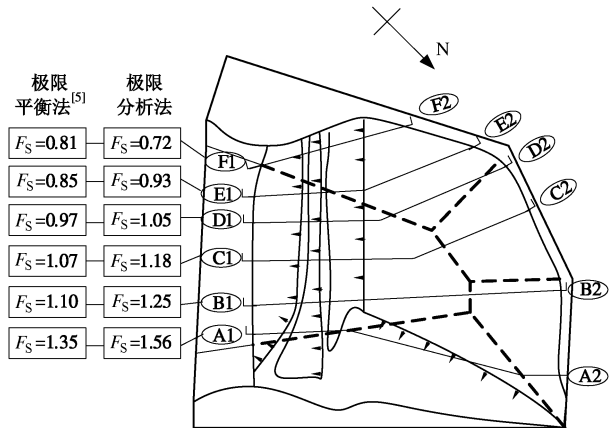


图 9 二维各截面稳定性安全系数

Fig. 9 2D safety factors of sections A1/A2 through F1/F2

### 3 三维稳定性分析

#### 3.1 拟三维稳定分析

前文分析可知,仅通过二维截面稳定性分析,有时难以对填埋场整体稳定性进行评价,此时则应该采用三维整体稳定性分析。首先假设填埋体整体沿着一个水平投影方向滑动,即在俯视条件下整体滑动方向一致(如图 10 所示)。这种情况下也就相当于将无穷多个二维截面捏合在一起,其破坏机构的构建与二维类似,关键是要保证相邻截面的速度相同,是一种拟三维的分析方法。

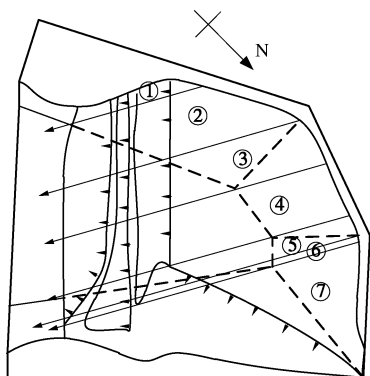


图 10 填埋场整体滑动示意图

Fig. 10 Illustration of movement of whole mass

以图 10 所示的滑动方向为例,将填埋体划分为 7 个区域,第②、③和④区域的三维示意图如图 11 所示。图 12 (a) ~ (c) 分别为第②、③区域交界面处的速度矢量关系,第③、④区域交界面处的速度矢量关系和区域③内任一截面的速度矢量关系。由于假设整体沿着同一方向滑动,易知线  $P_{23-1}P_{23-2}$ ,  $P_{34-1}P_{34-2}$  和  $P_{3-1}P_{3-2}$  倾角相同,线  $P_{23-2}P_{23-4}$  和  $P_{3-2}P_{3-5}$  倾角相同,线  $P_{34-2}P_{34-4}$  和  $P_{3-5}P_{3-4}$  倾角相同。因此令  $v_{23-b} = v_{34-b} = v_{3-b}$ , 可得  $v_{3-a1} = v_{34-a}$  及  $v_{3-a2} = v_{23-a}$ , 也就是说相邻截面的速度相同,如此建立的拟三维破坏机构是合理的。

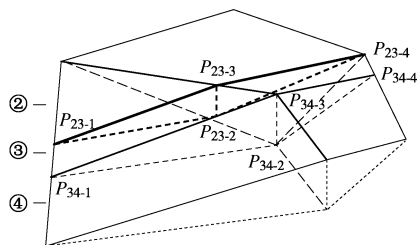
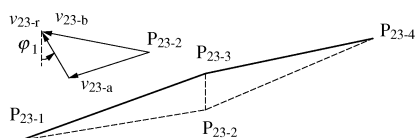
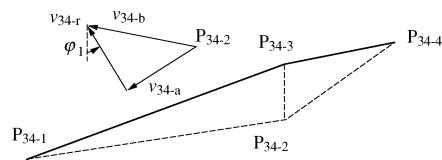


图 11 第②、③和④区域三维示意图

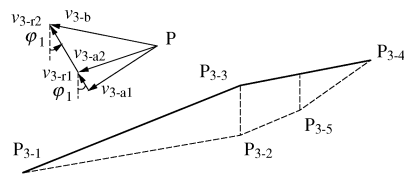
Fig. 11 3D schematic illustration of zones ②, ③ and ④



(a) 第②、③区域交界面



(b) 第③、④区域交界面



(c) 第③区域内任一截面

图 12 速度矢量图

Fig. 12 Velocity hodograph

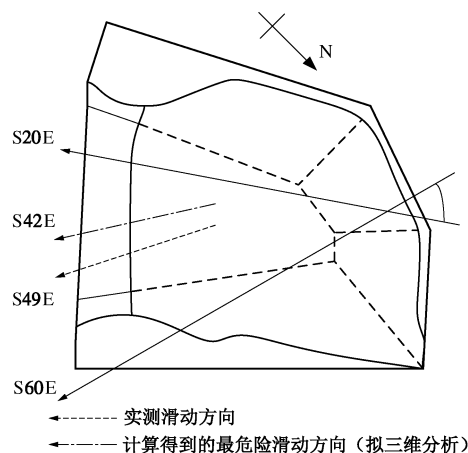


图 13 填埋场滑动方向示意图

Fig. 13 Illustration of sliding direction

计算安全系数的过程如图 8 所示,通过计算得到一系列不同的滑动方向下的填埋场安全系数,取其最小安全系数对应的滑动方向为填埋场最危险的滑动方向。如图 13 所示,取滑动方向从 S20E (南偏东 20°) 到 S60E (南偏东 60°) 进行分析,计算得到的安全系数绘于图 14 中。从图中可以看出当滑动方向为 S42E 时,填埋场安全系数最小 (1.267),而实测的填埋体滑动方向为 S49E。

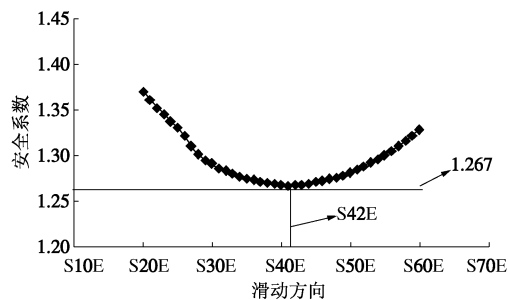


图 14 滑动方向与安全系数的关系

Fig. 14 Relationship between safety factors and directions

#### 3.2 三维多个块体稳定分析

拟三维分析只能假设填埋体整体沿着一个方向滑

动, 虽然其可以通过计算一系列滑动方向下的安全系数来寻找最小安全系数及最危险的滑动方向, 但其得到的结果也只是一种“平均”意义上的解, 并不能反映填埋体的真实滑动情况。因此需要将填埋体划分为多个块体, 并有各自独立的滑动方向, 这样通过搜索最小安全系数就可以得到最危险是相应的各块体滑动方向。但是这种真实三维多个块体破坏机构是很难构建的, ①要使块体既满足填埋场复杂的几何边界条件, 又满足空间上的速度相容条件; ②块体越多独立变量越多, 就会大大提高计算量, 增加搜索难度。本文选择 4 个块体 (3 个独立变量) 来构建破坏机构, 对实际填埋场的三维整体稳定性极限分析进行初步的探索和尝试。

如图 15 所示, 将填埋场划分为 4 个块体, 其中第 I、II 和 III 块体的滑动方向为未知变量, 第 IV 块体的滑动方向则由前 3 个块体的速度相容关系来确定。根据关联流动法则 2 个块体交界面上的分离速度与界面的夹角应为材料的内摩擦角  $\varphi$ 。如图 16 所示, 图中实线箭头代表块体的速度, 实线代表 2 个块体的交界面, 点划线代表块体交界面上的分离速度方向其与实线的夹角为  $\varphi$ , 虚线平行于点划线。图 16 (a) 表示的是块体 II 向左上方移动 (即  $v_2$  位于  $v_1$  上方), 块体 III 向左下方移动 ( $v_3$  位于  $v_1$  下方)。图 16 (b) 表示的是块体 II 向左下方移动 ( $v_2$  位于  $v_1$  下方), 块体 III 向左上方移动 ( $v_3$  位于  $v_1$  上方)。对于 Kettleman Hills 这类“山谷”型填埋场 (图 2) 来说, 上下两侧都有侧壁围护, 故位于上方的块体 II 更有可能向左下方移动, 而位于下方的块体 III 更有可能向左上方移动, 因此应采用图 16 (b) 所示的速度矢量图进行分析。而要构建出图 16 (b) 所示的速度矢量图, 应保证速度  $v_1$  与间断面的夹角要大于  $\varphi$ , 也就是说块体 I 的张角  $\omega$  要大于  $2\varphi$ 。

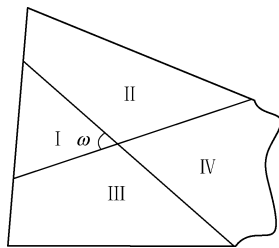
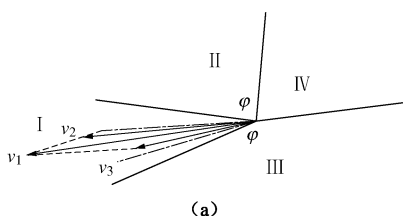
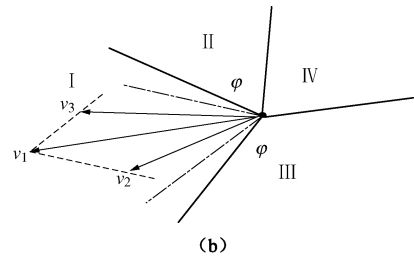


图 15 填埋场块体划分示意图

Fig. 15 Illustration of dividing blocks



(a)

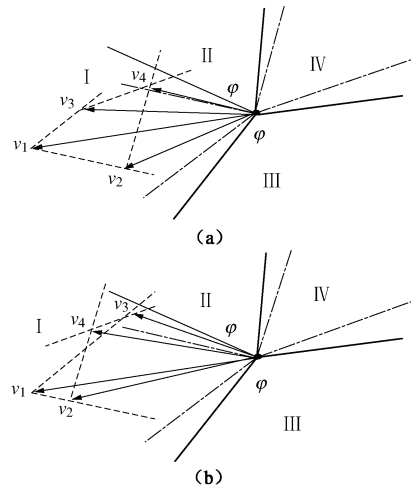


(b)

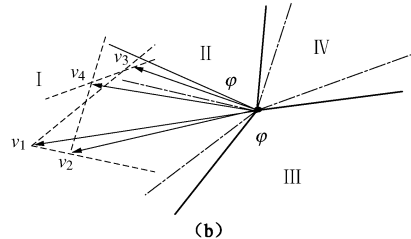
图 16 第 I, II, III 块体的速度矢量分析图

Fig. 16 Velocity hodographs of Blocks I, II and III

如图 17 所示, 根据图 16 (b) 所示的速度矢量, 进一步分析块体 IV 的速度。块体 IV 的移动同样要满足关联流动法则, 根据  $v_2$  及  $v_3$  就能唯一确定  $v_4$  的大小和方向。图 17 (a) 构建的  $v_4$  小于  $v_3$ , 这样得到的间断面分离速度方向 ( $v_4 \rightarrow v_3$ ) 合理, 而图 17 (b) 构建的  $v_4$  大于  $v_3$ , 这样得到的间断面分离速度方向 ( $v_4 \rightarrow v_3$ ) 就不合理了。同样, 构建出来的  $v_4$  也应该小于  $v_2$ 。因此要构建合理的速度运动场, 还要保证  $v_4$  小于  $v_2$  和  $v_3$ 。



(a)



(b)

图 17 第 II, III, IV 块体的速度矢量分析图

Fig. 17 Velocity hodographs of Blocks II, III and IV

接下来按照前文得到的结果, 对 Kettleman Hills 填埋场进行分析。如图 18 所示, 将填埋场划分为 4 个块体, 假设第 I、II 和 III 块体的滑动方向不同, 通过对各块体滑动方向进行组合, 计算得到安全系数最小时各块体的滑动方向。不同块体不同滑动方向下计算得到的安全系数如图 19 所示, 可以看出当  $\theta_1=15^\circ$ ,

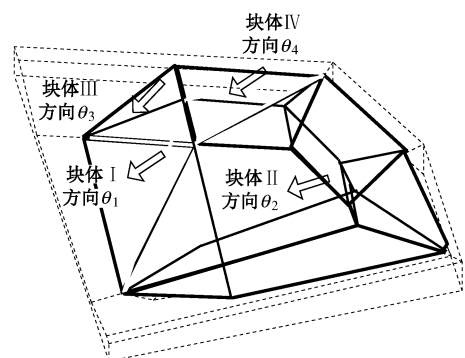


图 18 填埋场分块示意图

Fig. 18 Dividing of landfill

$\theta_2=25^\circ$  ,  $\theta_3=-35^\circ$  时, 填埋场安全系数最小为 1.117, 此时块体 I 相对应的滑动方向为 S45E (实测为 S49E)。同样可以看出, 上一节中的拟三维分析实际上就是本节分析中的一个特例 (即当各块体滑动方向相同时)。

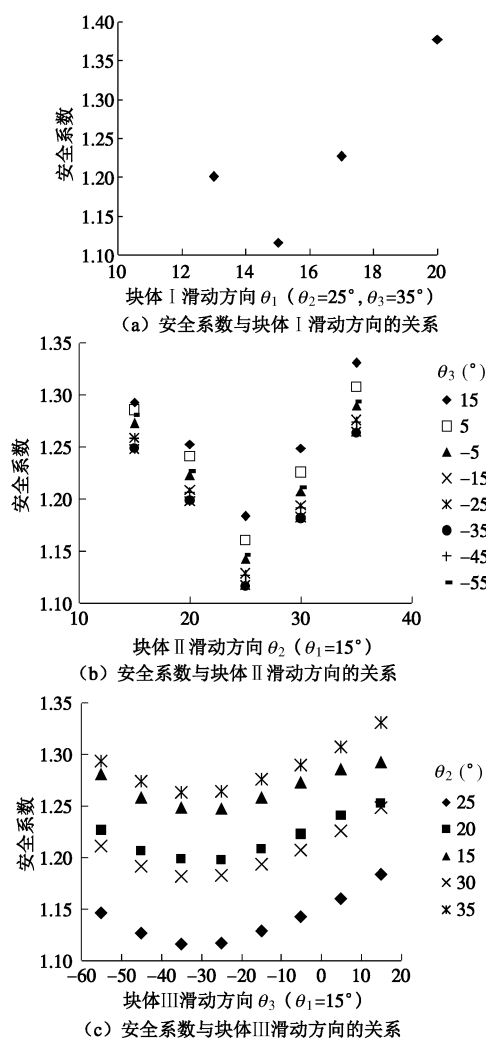


图 19 不同块体不同滑动方向的安全系数

Fig. 19 Relationship between safety factors and directions

3.3 三维弹塑性有限元分析

同时本研究还采用弹塑性有限元法进行对比验证。由于衬垫材料的特殊性, 在弹塑性有限元分析中应采用摩擦单元进行模拟, 而堆填体则看做土体材料进行模拟。有限元网格划分如图 20 所示, 其中地基采用较粗的网格, 堆填体采用较细的网格, 单元类型都是 C3D10 四面体二次单元。堆填体及衬垫系统的强度参数与前文相同, 堆填体弹性模量  $E=5\text{ MPa}$ , 泊松比  $\nu=0.3$ 。分析得到的折减系数与水平位移的关系如图 21 所示, 安全系数为 1.03, 其相对应的位移矢量图如图 22 所示, 等效塑性应变云图如图 23 所示。从图 22 中可以看出地基几乎没有位移发生, 而堆填体发生了大量的移动。从图 23 可知填埋场破坏时, 堆填体内部并没有产生贯通的塑性应变。表明了该填埋场不是在

堆填体内发生破坏, 而是基本全部沿着衬垫界面发生破坏, 这也与实际破坏情况及极限分析中构建的破坏模式相同。

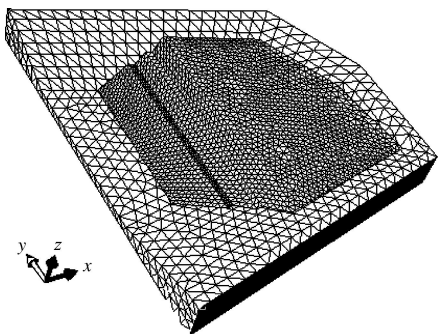


图 20 网格划分示意图

Fig. 20 Finite element mesh

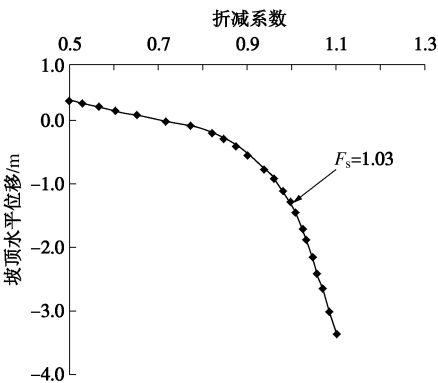


图 21 折减系数与位移的关系

Fig. 21 Relationship between reduction coefficient and displacement

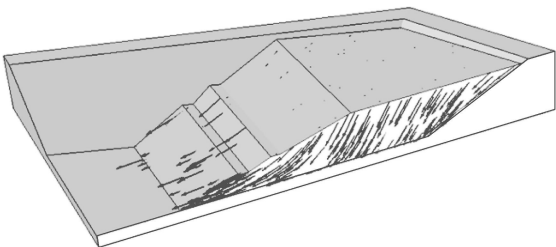


图 22 1/2 截面处位移矢量图

Fig. 22 Illustration of displacement vector at 1/2 section

同样 Seed 等<sup>[5]</sup>采用三维极限平衡法计算得到的安全系数为 0.96, 可以看出三维极限平衡解最小, 三维极限分析解最大。根据极限上限分析理论, 可以确定安全系数上限解是该填埋场所能承受极限荷载的一个不安全的上限, 故得到的安全系数偏大。而极限平衡法对破坏模式没有严格的要求 (如速度相容), 因此也无法确定其所得到的安全系数是偏于安全还是偏于危险, 甚至不能确定该破坏模式是否合理。但是总体上来看这 3 种三维方法计算得到的安全系数相差不大, 极限分析解与弹塑性有限元解也较为接近。

从极限上限分析理论上来说, 采用越多的块体及未知变量进行分析得到的安全系数就会越小并趋近于某一值, 也越能反映真实的破坏情况, 但这样带来的

计算难度也将会呈现指数形式上升。本文仅是采用了 4 个块体 3 个未知变量进行分析, 虽然计算结果偏大, 但与其他方法的结果相差不大, 并能够反映填埋体实际破坏情况, 且计算量相对较小, 同时也表明了该方法仍可以进一步的改进。

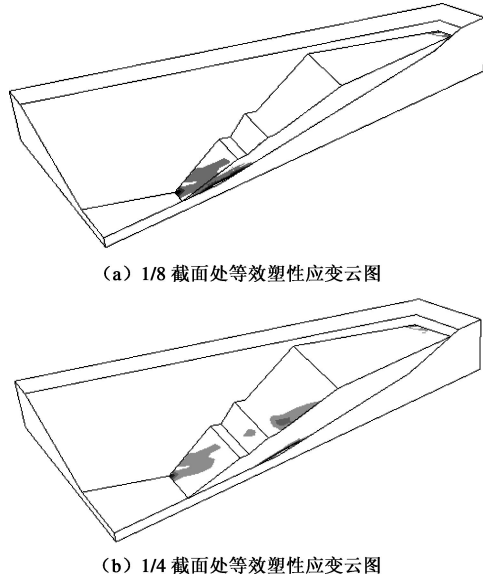


图 23 填埋场等效塑性应变云图

Fig. 23 Distribution of plastic strain

## 4 结 论

本文依托 Kettleman Hills 填埋场工程实例, 从二维、拟三维及三维方面详细的阐述了极限分析上限法在实际填埋场中的应用, 并通过与已有的文献及数值模拟结果进行对比验证方法的合理性及有效性。分析表明:

(1) 二维截面稳定性分析, 方法简单、计算快速, 但是对于几何形状较为复杂(如“山谷”型)的填埋场, 难以对其进行整体稳定性评价。

(2) 拟三维稳定性分析, 计算便捷, 能够对填埋场进行整体稳定性评价, 但是由于其假设填埋场整体沿着一个方向发生滑动, 得到的安全系数偏大, 适用于填埋场的初步快速分析。

(3) 三维多个块体稳定性分析, 能够尽可能的反映实际填埋场的破坏情况, 适用于填埋场的详细稳定性分析。但是其破坏机构的构建十分困难, 未知变量多, 搜索难度大。本文通过采用了 4 个块体及 3 个未知变量将极限分析上限法运用到复杂(“山谷”型)填埋场的三维整体稳定性研究, 虽然块体不多, 但已能反映实际填埋场的破坏情况。

## 参考文献:

- [1] KOERNER R M, SOONG T Y. Leachate in landfills: the stability issues[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, **18**: 293 - 309.
- [2] QIAN X, KOERNER R M, GRAY D H. Translational failure analysis of landfill[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, ASCE, 2003, **129**(6): 506 - 519.
- [3] 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))
- [4] 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. (FEN 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))
- [5] SEED R B, MITCHELL J K, SEED H B. Kettleman Hills waste landfill slope failure II: Stability analysis[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1990, **116**(4): 669 - 690.
- [6] STARK T D, POEPPPEL A R. Landfill liner interface strength from torsional-ring-shear tests[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1994, **120**(3): 597 - 615.
- [7] CHANG M. Three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill slope failure based on observed sliding-block mechanism[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, **32**: 587 - 599.
- [8] MITCHELL J K, SEED R B, SEED H B. Kettleman Hills waste landfill slope failure I: Liner system properties[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1990, **116**(4): 647 - 668.
- [9] BYRNE R J, KENDALL J, BROWN S. Cause and mechanism of failure, Kettleman Hills landfill B-19, phase IA[C]// Seed R B, Boulanger R W, ed. *Stability and Performance of Slopes and Embankments II*: 1128 - 1215.
- [10] SINGH S, MURPHY B. Evaluation of the stability of sanitary landfills[M]// LANDVA A, KNOWLES G D, eds. *Geotechnics of Waste Fills: Theory and Practice*. ASTM STP1070, 1990: 240 - 258.