

地震作用下垃圾填埋场三维失稳破坏分析^①

冯世进¹, 吴 恒¹, 李 鑫²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海市建筑科学研究院(集团)有限公司, 上海 200032)

摘要:在垃圾填埋场的设计和扩建阶段, 二维动力稳定性分析不一定能够合理反映填埋场的稳定现状。采用三维稳定分析方法, 考虑地震作用下填埋场不同高宽比、水平和竖向地震系数对其稳定性的影响, 结果表明不同高宽比和水平地震系数对于填埋稳定性具有较大影响; 在此基础上将三维动力稳定分析结果与二维分析做比较。该方法对于填埋场的抗震分析具有一定的参考价值。

关键词: 填埋场; 稳定性; 极限平衡; 三维

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1000-0285(2015)02-0285-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-04724.2015.02.0285

Three-dimensional Instability Analysis of Solid Waste Landfills under Earthquake Loading

FENG Shi-jin¹, WU Heng¹, LI Xin²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co. Ltd. (SRIBS), Shanghai 200032, China)

Abstract: For landfill stability design, the 2-dimensional method is convenient and simple, but it does not consider the effects of the landfill's geometry that may contribute to an instability failure. In this study, for the first time, a 3D seismic stability analysis method for landfills under earthquake loading is proposed. This was achieved by dividing the landfill into two zones called the maximum horizontal and maximum vertical lengths along the liner itself and analyzing the overall slip failure along the liner system. The method is based on the assumptions as follows: (1) the entire landfill slip is along the liner system, (2) because of the restrictions of surrounding bedrock, the entrance of the landfill is considered to be the main slip direction, thus assuming that the angle between axis and the shear stress at the bottom of the landfill is fixed, (3) the friction between the lateral zone interfaces is ignored (4) pressure applied at the base is concentrated at the center of the bottom surface. Through the 3D stability analysis method, considering the effects of horizontal and vertical seismic coefficients, a factor of safety (F_s) is established. Based on this method, the relationships among the height to width ratio, shear strength of the liner system, horizontal seismic coefficient, vertical seismic coefficient, and F_s are studied and discussed. The height to width ratio and horizontal seismic coefficient are shown to have an important effect on F_s . In addition, when the horizontal seismic coefficient is fixed, F_s decreases with an increasing height to width ratio. With a height to width ratio between 1 and 10, F_s decreases faster. However, when the ratio is greater than 10, the rate of the decrease of F_s becomes smaller. When the ratio is greater than

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41222021; 41172245); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB719803); 教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-13-0421)

作者简介: 冯世进, 男, 安徽东至人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学和环境岩土工程方面的研究。

E-mail: fsjgly@tongji.edu.cn

1 000, the curve is nearly linear, and F_s can be considered unchanged. Although the height to width ratio is an important factor affecting the stability of the landfill, this effect is reduced when the horizontal seismic coefficient become large. Thus, during landfill stability analysis, the selection of an appropriate analysis method according to the specific geological environment is important. In addition, the horizontal seismic coefficient is an important factor that affects the stability of the landfill. When the height to width ratio is fixed, F_s of the landfill decreases continuously as the horizontal seismic coefficient gradually increases from 0 to 0.3. Compared with the horizontal seismic coefficient, the effect of the vertical seismic coefficient is small and can be neglected for stability analysis. By comparing the results from 2D and 3D seismic stability analyses, the 2D method is found to greatly underestimate the stability of the landfill, whereas the 3D method is found to be more realistic. The 2D method will accurately reflect the stability of the landfill only in the case of a large height to width ratio. The 3D seismic stability analysis method established in this study is a valuable tool for landfill design.

Key words: landfill; stability; limit equilibrium; three-dimension

0 引言

卫生填埋是我国处理城市生活垃圾的主要手段, 填埋场是一种新型土工构筑物, 由于内部含有大量的渗滤液、气体等有害物质, 如果发生失稳破坏, 对于周边居民健康和生态环境将会造成致命伤害。

地震作用是导致填埋场发生较大变形和失稳破坏的主要诱因之一。地震作用下填埋场稳定分析一般采用拟静力法、等价线性方法和非线性方法。拟静力法是将地震作为惯性力作用于填埋场上, 基于极限平衡理论求得安全系数, 进而计算永久变形; 等价线性法联合动力变形法与极限平衡法, 引入简单的土体本构模型, 对填埋场进行动力稳定分析; 非线性法采用弹塑性土体本构模型, 能够直接进行永久位移计算。其中拟静力法应用较为广泛; Ling^[1]采用该方法对有限边坡和无限边坡对比分析; 柯瀚等^[2]对考虑浸润线填埋场进行永久位移计算; 冯世进等^[3]采用此方法考虑填埋场封顶系统的动力稳定问题; Qian 和 Koerner^[4]对填埋场沿衬垫系统失稳破坏进行二维动力分析。

无论在土石坝还是填埋场动力稳定分析中, 二维动力稳定分析方法都有快捷方便、简单易行、计算量小等优点, 但不能考虑填埋场几何构型对其失稳破坏的影响。三维稳定分析可以考虑不同几何构型反应填埋场的实际情况。本文拟采用拟静力法进行填埋场三维动力稳定分析, 分别考虑不同高宽比、水平和竖向地震系数等因素对于填埋场稳定性的影响, 同时将二维分析结果与三维分析结果做比较分析。

1 计算方法的建立

随着填埋高度的增加, 作用在填埋场底部衬垫界面的荷载逐渐增大; 同时在渗滤液的长期作用下, 衬垫材料逐渐老化, 将会导致衬垫界面剪切强度的降低, 这些不利因素的影响使得沿着衬垫系统填埋场整体滑移破坏成为一种较为常见的破坏方式。为了分析地震作用下填埋场这种整体失稳破坏模式, 首先, 沿衬垫系统将填埋场在最大横向和纵向范围内划分为 i 行和 j 列 (见图 1), 对填埋场沿衬垫系统整体滑移破坏进行受力分析。为合理分析其受力状态, 取一个单元体进行研究, 然后将其分别叠加即可获得填埋场整体稳定性。

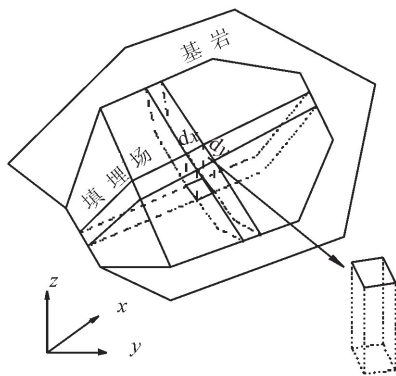


图 1 山谷型填埋场

Fig.1 A valley-type landfill

该方法引入以下几项假设:

- (1) 填埋场整体沿衬垫发生滑移破坏;
- (2) 从图 1 可知, 由于周围基岩的限制, 填埋场的入口 (x 轴方向) 是主要的滑移方向, 故假设填埋

场单元体底部剪切力 T 与 x 轴夹角为 ρ 固定不变;

(3) 山谷型填埋场底部一般有一定坡度,故假设行界面(平行于 yo 平面的界面)间作用力 G 与 x 轴夹角为 β ;

(4) 填埋场主要沿着 x 方向滑移,忽略横向列界面间摩擦力,只考虑单元体列界面(平行于 xoy 面的界面)间作用力 Q (垂直于列界面);

(5) 单元体重力为 W_{ij} ,单元体受到的水平和竖向地震力分别为 $k_h W$ 和 $k_v W$,作用点取中心点处。底面压力 N 作用于底面中心处。单元体受力图如图 2 所示。

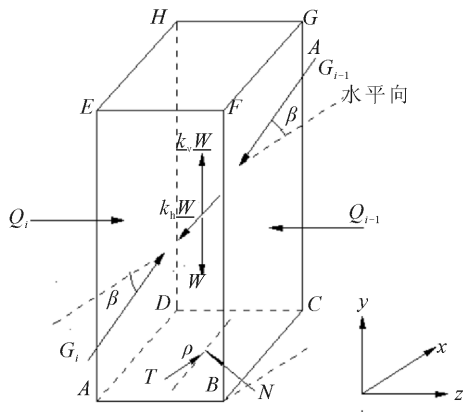


图 2 单元条柱受力图

Fig.2 Forces applied on the column

其具体推导过程如下:

$$N_i = \frac{[(1 - k_v) \cdot W_{ij} - c_e \cdot A_{ij} \cdot m_y] \cdot \cos\beta + (c_e \cdot A_{ij} \cdot m_x - k_h \cdot W_{ij}) \cdot \sin\beta}{\cos\beta \cdot (n_y + \tan\varphi_e \cdot m_y) - \sin\beta \cdot (\tan\varphi_e \cdot m_x + n_x)} \quad (5)$$

式(5)中,底面积 A_{ij} 和单元体重量 W_{ij} 可由积分求得:

$$A_{ij} = \iint_S ds \quad (6)$$

$$W_{ij} = \iiint_\Omega \gamma dv \quad (7)$$

式中 γ 为垃圾体的重度,通过底面 $ABCD$ 四点坐标求得底面中心坐标,通过中心点做切面,中心点处内法线方向表示压力 N 的方向导数 n_x, n_y, n_z ,摩阻力 T 的方向导数为 m_x, m_y, m_z ;

(2) 建立整体沿衬垫破坏的力平衡方程和绕 Z 轴的力矩平衡方程:

在 S 轴方向,建立整体平衡方程可得:

$$S = \sum [(1 - k_v) \cdot W_{ij} - N_{ij} \cdot n_y - T_{ij} \cdot m_y] \cdot \sin\beta - (N_{ij} \cdot n_x + T_{ij} \cdot m_x - k_h \cdot W_{ij}) \cdot \cos\beta = 0 \quad (8)$$

对滑裂面上的 $\tan\varphi$ 和 c ,按照强度折减法进行折减:

$$\tan\varphi_e = \tan\varphi / F_s \quad (1)$$

$$c_e = c / F_s \quad (2)$$

单元体在 xoy 面投影,如图 3 所示。

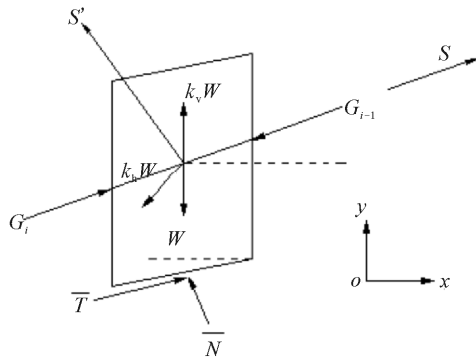


图 3 作用在条柱上的力在 S 轴方向的投影

Fig.3 Projection of forces applied on the column along S -axis

(1) 在 S' 方向上,对条柱进行受力平衡分析可得:

$$((1 - k_v) \cdot W_{ij} - N_{ij} \cdot n_y - T_{ij} \cdot m_y) \cdot \cos\beta + (N_{ij} \cdot n_x + T_{ij} \cdot m_x - k_h \cdot W_{ij}) \cdot \sin\beta = 0 \quad (3)$$

根据摩尔-库伦准则可得:

$$T_{ij} = N_{ij} \cdot \tan\varphi_e + c_e \cdot A_{ij} \quad (4)$$

将式(4)带入式(3)可得条底法向力 N_{ij} 为:

z 轴方向建立整体平衡方程可得:

$$Z = \sum (N_{ij} \cdot n_z + T_{ij} \cdot m_z) = 0 \quad (9)$$

建立绕 z 轴的整体力矩平衡方程可得:

$$M = \sum [-(1 - k_v) \cdot W_{ij} \cdot x - N_{ij} \cdot n_y \cdot x + N_{ij} \cdot n_x \cdot y - T_{ij} \cdot m_x \cdot y + T_{ij} \cdot m_y \cdot x + k_h \cdot W_{ij}] = 0 \quad (10)$$

以上是关于安全系数 F_s ,倾角 β 和底面摩擦力偏角 ρ 的三元方程,通过迭代可求解。

2 计算结果分析

通过上述方法对填埋场进行沿衬垫系统整体动力失稳破坏分析。图 4 为三维整体沿衬垫系统失稳破坏模型图,基本参数如下:模型沿平面 xoy 对称,侧向倾斜角度 $\theta_d = 26.6^\circ$,填埋高度 $H = 45$ m,地面宽度 $B = 45$ m。图 5 为沿中线在 xoy 平面的剖面图。垃圾体与衬垫界面参数的选取:垃圾体的重度

为 15.72 kN/m^3 , 摩擦角度 $\varphi_w = 30^\circ$ (远远大于衬垫系统), 与封顶系统不同, 在衬垫系统失稳过程中高应力状态下的底部衬垫系统摩擦角发挥主要作用, 故采用不同摩擦角对模型进行对比分析。在模型失稳破坏分析中, 通过扩大宽高比系数 (选取 $B/H = 1\ 000$) 来代替二维分析结果, 地震影响应对填埋场稳定存在较大的影响, 将采用拟静力法对填埋场进行三维动力稳定分析计算, 水平和竖向的地震力分别用水平地震系数 k_h 和竖向地震系数 k_v 与重量乘积来代替。

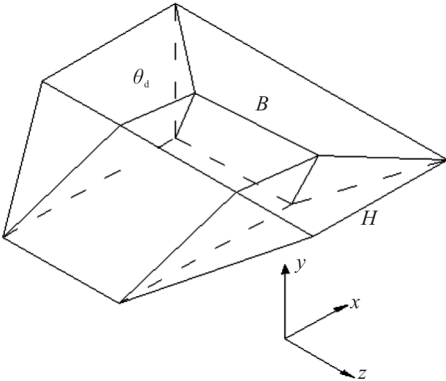


图 4 三维计算模型

Fig.4 Three dimensional calculated model

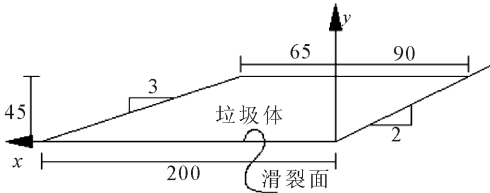


图 5 中心剖面图

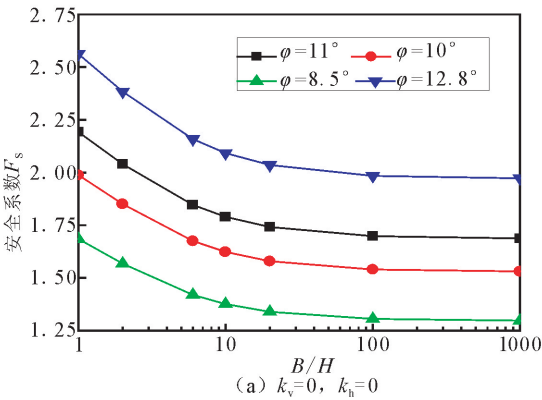
Fig.5 Center section of the 3D model

2.1 高宽比对填埋场稳定性的影响

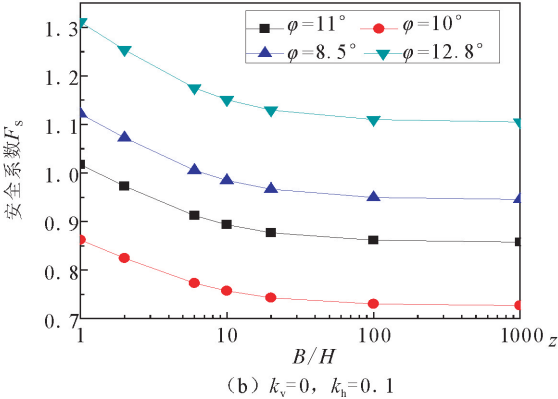
图 6 为衬垫界面摩擦角变化时, 填埋场安全系数随高宽比变化的曲线。可以看出, 填埋场安全系数随衬垫界面摩擦角的增加不断增大, 在衬垫系界面摩擦角恒定时, 随着高宽比的增加安全系数逐渐降低, 但是当 B/H 超过 10 时, 安全系数随 B/H 的变化较小, 且与二维 spencer 法计算结果相同, 这表明在 B/H 较大的情况下, 采用二维分析模型也可以得到合理的计算结果。

2.2 水平地震系数 k_h 对填埋场稳定性的影响

图 7 为填埋场在水平地震力作用下安全系数随高宽比变化的曲线。可以看出, 在高宽比 B/H 恒定时, 水平地震系数 k_h 从 0 增加到 0.3, 安全系数 F_s 不断减小; 当水平地震系数 k_h 不变时, 随着高宽



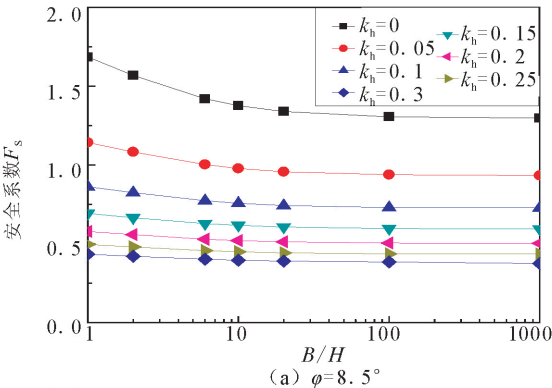
(a) $k_v=0, k_h=0$



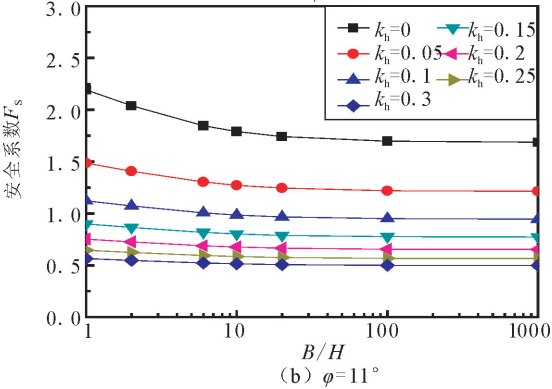
(b) $k_v=0, k_h=0.1$

图 6 填埋场安全系数随着高宽比的变化曲线

Fig.6 Variation curve of factor of safety with B/H



(a) $\varphi=8.5^\circ$



(b) $\varphi=11^\circ$

图 7 填埋场安全系数随 k_h 变化的曲线

Fig.7 Variation curve of factor of safety with k_h

比 B/H 的不断増加,安全系数 F_s 也在不断减少。进一步可以发现,当 k_h 较大时,高宽比 B/H 的变化对安全系数 F_s 的影响较小;而当 k_h 较小时, B/H 的变化对安全系数 F_s 的影响较大,尤其是 B/H 处于 1~10 范围内。

2.3 竖向地震系数 k_v 对填埋场稳定性的影响

图 8 为不同水平地震系数条件下填埋场安全系数随竖向地震系数的变化曲线,分析了 $k_v/k_h=0.2$ 和 $k_v/k_h=0.5$ 两种情况竖向地震系数对于填埋场三维稳定性的影响。图中实线为 $k_v=0$ 时,不同水平地震系数作用下填埋场的三维动力稳定分析结果;虚线为考虑竖向地震系数 $k_v \neq 0$ 时,填埋场安全系数分析结果。由图 8(a)和(b)可以看出,随着水平地震系数的增加,安全系数逐渐降低,但随着竖向地震系数的增加,安全系数的变化却很小,可以忽略不计。由此可见,在实际工程中水平地震系数是影响填埋场稳定性的首要考虑因素,竖向地震系数可以忽略不计。

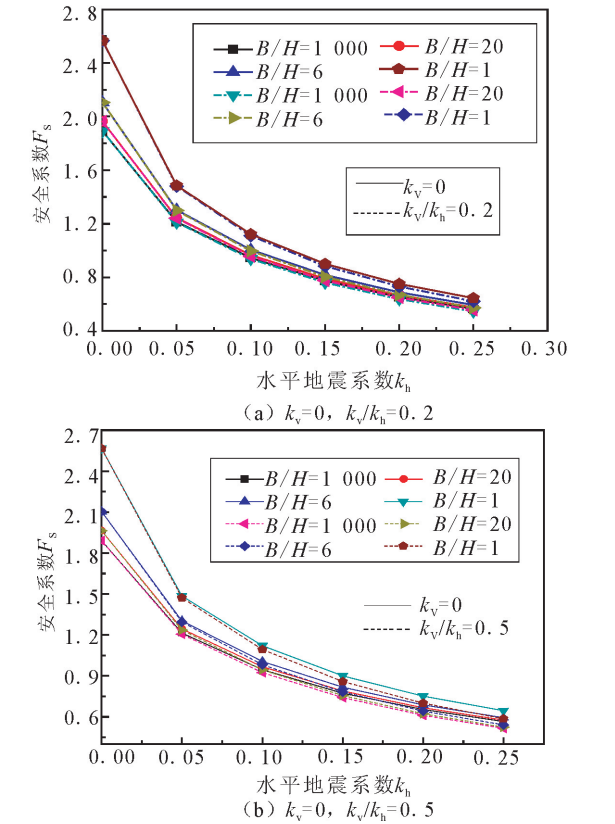


图 8 填埋场安全系数随 k_v 变化的曲线
Fig.8 Variation of factor of safety with k_v under different horizontal seismic coefficients

2.4 三维与二维分析结果的对比

图 9 为三维分析结果与二维 spencer 法分析结

果的对比分析曲线。衬垫界面摩擦角 $\varphi=11^\circ$,在不同水平地震系数作用下填埋场安全系数随着 B/H 的变化而改变。当 $B/H=1\ 000$ 时,填埋场安全系数与二维 spencer 法计算结果相同,特别是当 $B/H=1, k_h=0.05$ 时,比值达到最大约 1.22。可见填埋场的三维效应作用效果是很明显的,若不考虑填埋场几何构型,而采用二维分析方法会大大低估填埋场的稳定性。同时,当高宽比不变时,随着水平地震系数的增加比值越来越小,由此可见,地震使得填埋场三维效应作用降低。故在实际工程中,应根据具体情况选取填埋场填埋稳定分析方法,以达到既准确又经济的设计要求。

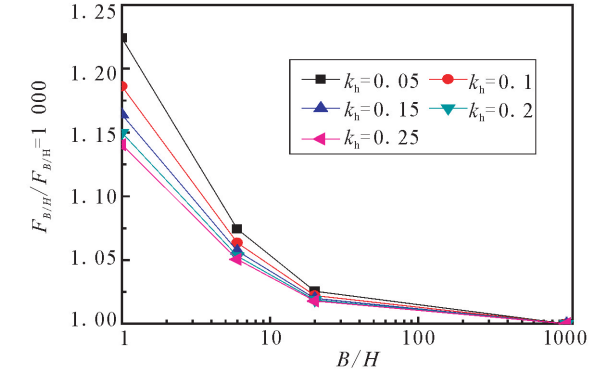


图 9 比值的变化曲线
Fig.9 Variation of the ratio between 3D and 2D

3 结论

本文通过拟静力法,采用三维稳定分析方法对填埋场沿衬垫系统整体破坏进行稳定分析,得出以下结论:

- (1) 水平地震系数固定时,填埋场的安全系数随着高宽比的增加不断减小;当 B/H 在 1~10 之间变化时,填埋场安全系数递减速度较快,但 B/H 大于 10 以后,安全系数递减速度逐渐变小,特别是当 B/H 大于 1 000 以后,可以认为安全系数无变化。高宽比是影响填埋场稳定性的重要因素,但在水平地震系数较大的情况下高宽比变化对填埋场稳定性的影响降低。因而在填埋场稳定分析中,要针对填埋场不同的地理环境,选取适当的分析方法,三维效应不容忽略。
- (2) 当高宽比固定时,随着水平地震系数 k_h 从 0 逐渐增大到 0.3,填埋场安全系数 F_s 不断减小,因此水平地震系数是影响填埋场稳定性的重要因素。

2005,25(7-10):753-762.

[10] Ashford S A, Juirnarongrit T, Sugano T, et al. Soil-pile Response to Blast-induced Lateral Spreading. I: Field Test[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(2): 152-162.

[11] Abdoun T, Dobry R, O'Rourke T, et al. Single Piles in Lateral Spreads: Field Bending Moment Evaluation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(10): 879-89.

[12] 唐亮, 凌贤长, 艾哈迈德·艾格玛. 液化侧向流动场地桩基动力反应振动台试验三维有限元数值模拟方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(S1): 180-184.

TANG Liang, LIANG Xian-zhang, Ahmed Elgamel. Three-dimensional Finite Element Analysis of Shake-table Test for Dynamic Pile Behavior in Liquefaction-induced Lateral Spreading Ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 180-184. (in Chinese)

[13] 唐亮, 凌贤长, 徐鹏举, 等. 液化场地桩-土地震相互作用振动台试验数值模拟[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊 1): 302-306.

TANG Liang, LIANG Xian-zhang, XU Peng-ju, et al. Numerical Simulation of Shaking Table Test for Seismic Soil-pile Interaction in Liquefying Ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Suppl): 302-306. (in Chinese)

[14] 唐亮. 液化场地桩-土动力相互作用 p - y 曲线模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

TANG Liang, p - y Model of Dynamic Pile-soil Interaction on Liquefying Ground[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

[15] 中华人民共和国行业标准编写组. GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50011-2010, Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

(上接 289 页)

(3) 与水平地震系数相比, 竖向地震系数的变化对于填埋场稳定性的影响较小, 可以忽略不计。

(4) 对比分析可知, 二维分析方法大大低估了填埋场的稳定性, 三维分析方法更符合实际。同时, 在高宽比较大的情况, 二维分析方法也可以准确地反映填埋场稳定性。

参考文献 (References)

[1] Ling HI, Leshchinsky D. Seismic Stability and Permanent of Landfill Cover Systems[J]. Geotech Geoenviron Eng, 1997, 123(2): 113-122.

[2] 柯瀚, 陈云敏, 凌道盛, 等. 城市垃圾填埋场地震稳定分析及永久位移计算[J]. 地震学报, 2001, 23(2): 204-212.

KE Han, CHEN Yun-min, LING Dao-sheng, et al. Stability and Permanent Displacements Analysis of Wasteland During Earthquakes[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(2): 204-

212. (in Chinese)

[3] Shi-jin Feng, Li-ya Gao. Seismic Stability Analyses for Landfill Cover Systems Under Different Seepage Buildup Conditions [J]. Environ Earth Sci, 2012, 66: 381-391.

[4] Qian X, Koerner RM. Modification to Translational Failure Analysis of Landfills Incorporating Seismicity[J]. Geotech Geoenviron Eng, 2010, 136(5): 718-727.

[5] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 524-529.

CHEH Zu-yu, MI Hong-liang, WANG Xiao-gang. A Three-dimensional Limit Equilibrium Method for Slope Stability Analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 525-529. (in Chinese)

[6] Muhsung Chang. A 3D Slope Stability Analysis Method Assuming Parallel Lines of Intersection and Differential Straining of Block Contacts[J]. Can Geotech J, 2002, 39: 799-811.