论 文

下卧土体局部沉陷条件下复合衬垫系统的受力变形性能及设计

陈云敏，陈若曦，朱 斌，高 登
（浙江大学岩土工程研究所，浙江 杭州 310027）

摘 要：考虑上覆土体的土拱效应及衬垫的大变形，将下卧土体局部沉陷条件下的复合衬垫系统分为滑动区和沉陷区。建立了其受力变形分析模型，并以衬垫系统的最大拉应变作为控制标准，建立了工程上衬垫系统的抗沉陷设计方法。利用该分析模型研究了滑动区衬垫界面强度、衬垫上覆土体的厚度、重度、有效内摩擦角等参数和衬垫结构形式的影响，发现上覆土体厚度、重度及有效内摩擦角对衬垫受力变形影响很大，而衬垫的抗拉刚度直接决定了其拉应变大小。结合工程实例进行了衬垫系统的抗沉陷设计，并建议了衬垫的抗沉陷结构形式。

关键词：土拱效应；大变形；沉陷；复合衬垫系统；结构形式
中图分类号：TU472 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2008)01－0021－07

作者简介：陈云敏(1962－)，男，教授，博士生导师，主要从事环境土工、土动力学和基础工程方面的研究。E-mail: chenyunmin@zju.edu.cn。

Deformation characteristics and design of geosynthetic liner system subjected to local subsidence

CHEN Yun-min, CHEN Ruo-xi, ZHU Bin, GAO Deng
(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Taking into account the soil-arching effect and large deformation of liners, a model of force and deformation analysis was presented for the geosynthetic liner system subjected to local subsidence. Taking the maximum tensile strain of the liner system as the control parameter, the design method of the liner system resisting the local subsidence was given for the engineering application. Effects of shear strength of the liner system, the thickness, the bulk density, the effective internal friction angle of the overlaying soil and the structural configuration of the liner system were studied using the proposed model. It was shown that the thickness, the bulk density and the effective internal friction angle of the overlaying soil could greatly influence the force and deformation of the liner system, and the tensile strain of the liner system mostly depended on its tensile stiffness. The coving system and the liner system between the old and expanded landfills were designed to resist the local subsidence for the vertical expansion of a given valley landfill, and the reasonable structural configurations of the coving system and the liner system were recommended.

Key words: soil-arching effect; large deformation; subsidence; geosynthetic liner system; structural configuration

0 引 言

由于“喀斯特”地貌[1]及垃圾填埋场中易腐蚀垃圾（如蔬菜、易锈蚀金属器具）的存在，垃圾填埋场中复合衬垫系统下卧土体可能发生局部沉陷甚至空洞，国外文献称为“rusted refrigerator problem”[2]，使得复合衬垫系统完全悬于沉陷区上方并承受上覆土体荷载，如图1所示。

下卧土体局部沉陷将导致复合衬垫系统中的土工合成材料（如土工膜、土工织物、土工复合膨润土垫（GCL）、土工复合排水网、土工格栅等）产生拉应变，可能引起复合衬垫系统拉伸破坏并导致防渗功能失效从而对周围环境造成严重污染，甚至能大幅提高竖向扩建填埋场中间衬垫系统下卧垃圾土体中渗滤液水头高度，从而导致堆体失稳。另一方面，衬垫系统造价

基金项目：国家自然科学基金重点资助项目（50538080）；国家杰出青年科学基金资助项目（50425825）
收稿日期：2007－01－23

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可达整个填埋场总造价的 30%，因而其抗沉陷设计是垃圾填埋场设计中的重要内容之一。

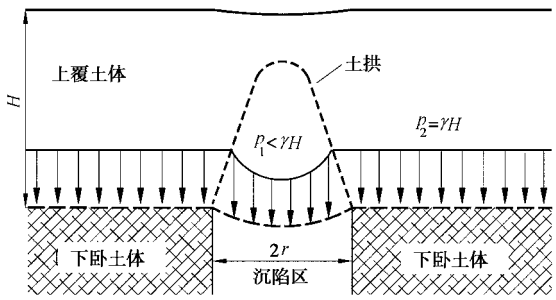


图 1 下卧土体局部沉陷条件下衬垫系统受力及变形示意图

Fig. 1 Liner system subjected to local subsidence of soil

Grioud 等[3]首先对上述问题进行了研究，给出了衬垫系统考虑土拱效应的上覆荷载计算公式及衬垫系统允许应变和允许张拉力之间的半经验关系，并提出了相应的工程设计方法。由于在分析中假定沉陷区横截面为圆弧形，且应变处处相等，以及沉陷区外衬垫系统与周围土体无相对滑移等，而使得该模型较为粗糙。Finey 等[4]采用有限差分程序 FLAC 对覆盖层衬垫系统局部沉陷问题也进行了研究，其模型考虑了土工膜和周围土体的相对滑移，计算结果表明实际沉陷横截面并非圆弧形，但其工作没有考虑土拱效应的影响，只对覆盖层进行了分析。由于衬垫系统上覆荷载大小对其受力及变形有很大的影响且这一问题对于填埋场竖向扩建时新老填埋场交界面处的衬垫设计显得尤为重要。Qian 等[2]针对填埋场的竖向扩建，修正了 Giroud 等[3]的上覆荷载计算公式及其设计方法。Kuo 等[5]考虑不同沉陷半径及垃圾强度等因素给出了设计图表，对垃圾填埋场衬垫系统的防局部沉陷设计有一定的参考意义。

总的看来，现有的分析模型均基于下卧土体局部沉陷条件下衬垫系统变形与应力之间的半经验关系[3]或相应的数值分析软件，未能从物理本质上较好地揭示局部沉陷作用下衬垫系统的受力性状，也没有给出防止局部沉陷的合理衬垫形式。

本文结合 Qian 等[2]提出的修正上覆荷载计算公式，考虑沉陷区外衬垫系统与其上下土体之间的滑移，基于膜的大变形理论建立了下卧土体局部沉陷条件下衬垫系统的受力变形分析模型，并得到了衬垫系统应力和位移的迭代解。

通过参数分析研究了滑动区界面强度、上覆土体厚度、重度与有效内摩擦角等因素的影响，评价了不同衬垫形式的抗局部沉陷性能。同时还提出了基于这个理论的工程的设计方法，并且进行了具体工程实例分析。

1 轴对称沉陷分析模型

1.1 分析模型的建立和求解

垃圾填埋场中下卧土体局部沉陷条件下复合衬垫系统的受力变形分析示意图如图 2 所示，将复合衬垫系统简化为单层膜进行分析。沉陷区附近的衬垫系统分成沉陷区和滑动区两个区域。沉陷区的沉陷半径为 r_1，考虑土拱效应的上覆荷载为 p_1；环形滑动区的径向宽度为 r_2，上覆荷载为 p_2，滑动区外边界自由。衬垫系统在滑动区的滑动，使得沉陷发生后横截面上沉陷区和滑动区的交界点向沉陷区移动，其水平位移为 u_0，沉陷区边界与滑动区边界夹角为 θ，则竖向位移 $w_0=u_0\tan\theta$。滑动区衬垫上下表面的剪应力分别为 τ_{f1} 及 τ_{f2}。根据膜的大变形理论按图 2 可列出模型的相关控制方程。

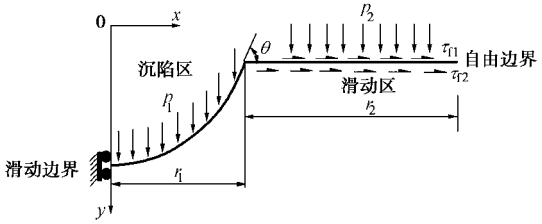


图 2 分析模型

Fig. 2 Analytical model

对于沉陷区（$0<r\le r_1$），根据弹性力学理论列出衬垫的平衡方程、物理方程和考虑大变形的几何方程，可得沉陷区水平位移 u 和竖向位移 w 的基本解[6]，代入几何方程可得衬垫系统的径向应变和环向应变：

$$\varepsilon_r=\frac{du}{dr}+\frac{1}{2}\left(\frac{dw}{dr}\right)^2 \quad , \tag{1}$$

$$\varepsilon_t=\frac{u}{r} \quad , \tag{2}$$

式中，ε_r 和 ε_t 分别为衬垫系统的径向应变和环向应变。将它们代入衬垫系统的物理方程得到衬垫系统的径向和环向内力：

$$N_r=\frac{Et}{1-v^2}(\varepsilon_r+v\varepsilon_t) \quad , \tag{3}$$

$$N_t=\frac{Et}{1-v^2}(\varepsilon_t+v\varepsilon_r) \quad , \tag{4}$$

式中，N_r 为衬垫系统单位宽度的径向力，N_t 为衬垫系统单位宽度的环向力，v 为衬垫的泊松比。

对于滑动区（$r_1\le r\le r_1+r_2$），假设滑动区衬垫上下表面剪应力均匀分布，且都达到了极限状态，即 $\tau_{f1}=c_1+p_2\tan\varphi_1$，$\tau_{f2}=c_2+p_2\tan\varphi_2$，其中 c_1，c_2 分别为衬垫上下界面的黏聚力，而 φ_1，φ_2 分别为衬垫上下界面的内摩擦角。离沉陷区边缘距离为 r 的衬垫截面总径向拉力为

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$N_0'(r)=2\pi\int_r^{r_1+r_2} r\,\mathrm{d}r(\tau_{f1}+\tau_{f2})$$
$$=\pi[(r_1+r_2)^2-r^2](\tau_{f1}+\tau_{f2}) \quad , \tag{5}$$

滑动区衬垫的径向应变为

$$\varepsilon_r'=\frac{\mathrm{d}u'}{\mathrm{d}r}=\frac{1}{E}(\sigma_r'-v\sigma_t') \quad , \tag{6}$$

式中，u' 为滑动区衬垫的水平位移，σ_r' 为滑动区衬垫的径向应力，σ_t' 为滑动区衬垫的环向应力。

将式（1）～（5）代入式（6）得

$$\frac{\mathrm{d}u'}{\mathrm{d}r}+v\frac{u'}{r}+Dr+\frac{F}{r}=0 \quad 。 \tag{7}$$

式中 $D=\dfrac{(\tau_{f1}+\tau_{f2})(1-v^2)}{2Et}$；$F=-D(r_1+r_2)^2$。求解式（7），并由边界条件 $u'=0$（$r=r_1+r_2$ 时），可得沉陷区边缘衬垫的径向位移：

$$u'(r_1)=-\frac{Dr_1^2}{v+2}-\frac{F}{v}+\frac{r_1^{-v}}{(r_1+r_2)^{-v}}[\frac{D(r_1+r_2)^2}{v+2}+\frac{F}{v}], \tag{8}$$

式中，滑动区半径 r_2 可由沉陷区边缘的拉力代入式（5）得

$$r_2=\sqrt{\frac{N_0'(r_1)}{\pi(\tau_{f1}+\tau_{f2})}+r_1^2}-r_1 \quad 。 \tag{9}$$

利用沉陷区和滑动区交界处衬垫位移协调和内力平衡，通过迭代法求得整个衬垫系统的内力和位移。求解过程如图 3 所示，并编制了相应的 Matlab 计算程序 FDLLS。

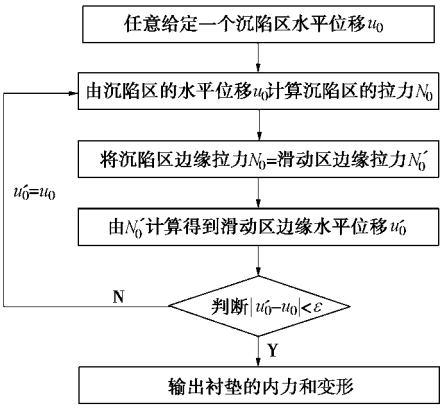


图 3 衬垫系统内力和位移求解过程示意图

Fig. 3 Determination of internal force and displacement of liner system

1.2　衬垫系统的上覆荷载

当下卧土体发生局部沉陷时，衬垫系统的上覆土体由于变形发生土拱效应，将一部分上覆荷载转移到沉陷区外，使沉陷区上衬垫的上覆应力相应减小，如图 1 所示。Terzaghi [7]首先建立了考虑土拱效应平面应变问题的上覆荷载计算公式；对于圆形的局部沉陷情况，Giroud [3]修正了 Terzaghi 的计算式，使之适用于轴对称情况；而 Qian 等[2]考虑了衬垫系统组成对土拱效应的影响，并根据经验认为当衬垫系统上覆土体厚度大于沉陷半径 6 倍时，土拱效应才较明显，本文在沉陷区采用其如下的上覆荷载计算公式：

$$p_1=\frac{r_1\gamma_{avg}}{2K\tan\phi}(1-\mathrm{e}^{-2K\tan\phi H/r_1}) \quad , \tag{10}$$

式中，ϕ 为上覆土体的有效内摩擦角，$K=1.06(1-\sin\phi)$ 为上覆土体的侧压力系数，γ_{avg} 为上覆土体的加权平均重度，H 为衬垫系统上覆土体的高度。图 4 为上覆荷载随上覆土体厚度的变化曲线，可以发现当 $H/r_1>6$ 时，上覆荷载大小基本不随上覆土体厚度而变化，并总体保持不变，土拱效应能较充分地发挥。在滑动区不考虑土拱效应并取 $p_2=\gamma_{avg}H$ [7]。

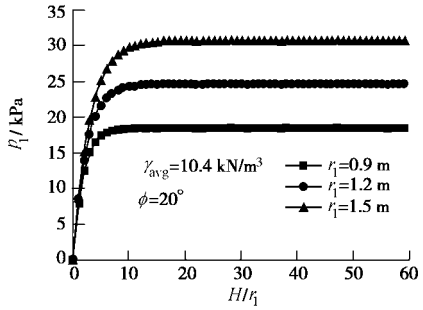


图 4 上覆土体厚度对上覆荷载的影响

Fig. 4 Effect of thickness of soil above liner system on overlying pressure

2　复合衬垫系统受力变形影响因素的分析

2.1　滑动区衬垫界面强度的影响

由于将整个衬垫系统简化为单层膜来分析，则衬垫界面强度指衬垫系统上下表面与其上下覆土体之间的界面强度。图 5（a）为滑动区衬垫系统不同界面强度对沉陷区衬垫系统竖向位移的影响，滑动区衬垫系统界面强度越小，则其抵抗沉陷产生的滑移能力就越弱，而沉陷区衬垫系统的竖向位移也越大。由于考虑了衬垫系统在滑动区的滑移，沉陷区衬垫系统边缘的竖向位移并不为 0。图 5（b）显示滑动区衬垫界面强度越大，滑动区与沉陷区交界处水平位移越小，滑动区的范围也越小。

2.2　上覆土体厚度的影响

如图 4 所示，上覆土体的厚度会影响复合衬垫系统上覆荷载大小，进而影响局部沉陷下复合衬垫系统的应变大小。图 6（a）为对于相同刚度的衬垫系统，沉陷半径上覆土体厚度对衬垫系统的最大应变的影响。由于土拱效应的存在，10 m 和 40 m 厚上覆土体所对应的荷载相差并不大，因而所计算的最大应变也

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

比较接近；但却与土拱效应没能较好发挥的 2 m 厚上覆土体的计算结果相差较大。图 6（b）为沉陷半径 $r_1=1.5$ m 时，不同上覆土体厚度对沉陷区衬垫竖向位移的影响。同 2 m 上覆土体厚度相比，随着 H 的增加，沉陷区衬垫的最大竖向位移也增加。然而由于 H=40 m 的滑动区的抗滑能力大于 H=10 m，而土拱效应使它们所对应的沉陷区上覆荷载相差并不大，因而 H=10 m 时沉陷区衬垫的竖向位移反而比 H=40 m 的情况大，但最大应变比后者小。

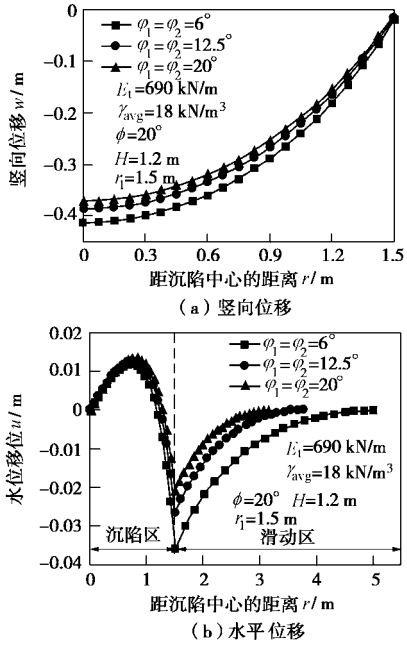


图 5 滑动区衬垫界面有效内摩擦角对衬垫系统的影响

Fig. 5 Effect of effective internal friction angle of liner interface on liner system

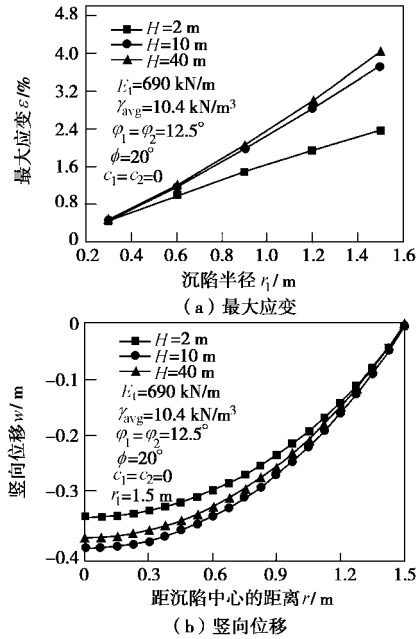


图 6 上覆土体厚度对衬垫系统的影响

Fig. 6 Effect of thickness of overlying soil on liner system

2.3 上覆土体重度的影响

如图 7 所示，上覆土体重度对沉陷区衬垫系统最大应变及竖向位移的影响直接而明显。上覆土体重度越大，衬垫最大应变及最大竖向位移也越大。

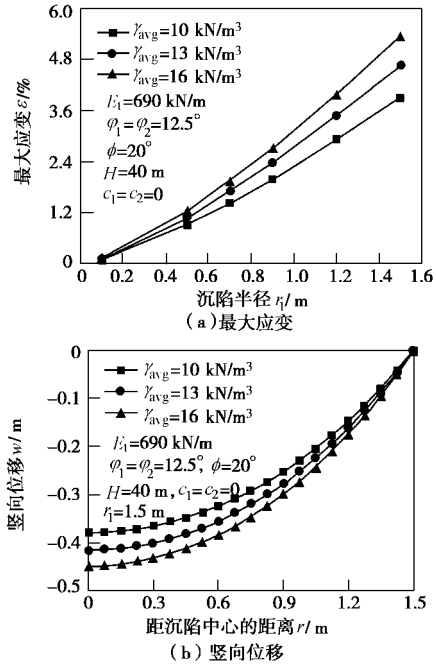


图 7 上覆土体重度对衬垫系统的影响

Fig. 7 Effect of bulk density of overlying soil on liner system

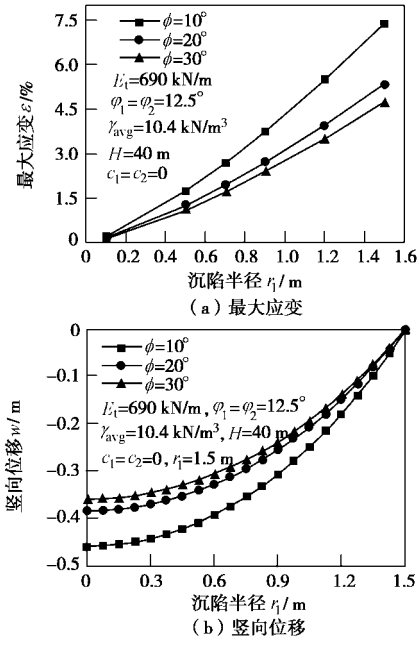


图 8 上覆土体有效内摩擦角对衬垫系统的影响

Fig. 8 Effect of effective internal friction angle on liner system

2.4 上覆土体有效内摩擦角的影响

上覆土体的有效内摩擦角对衬垫系统的上覆荷载影响较大，因而其对衬垫系统的受力和变形也有较大影响。由图 8（a）、（b）可以知道当上覆土体有效内摩擦角 $\phi>20^{\circ}$ 时，衬垫最大应变及最大竖向位移的增

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

加速率明显减慢，表明此时上覆土体的土拱效应已较明显[3]。

2.5　不同衬垫形式的受力及变形

不同形式复合衬垫在发生沉陷时，受力和变形性能差异很大，单纯从衬垫系统的抗拉刚度考虑，抗拉刚度 E_t 越大则衬垫系统的应变越小，抵抗沉陷的能力也就越强。对于四种典型的衬垫形式：单层 LLDPE 土工膜形式、单层 HDPE 土工膜形式、单层 LLDPE 与一层土工格栅形式及单层 LLDPE 与两层土工格栅形式，在相同荷载及沉陷尺寸条件下的沉陷区竖向位移、水平位移、环向应变及径向应变分别如图 9，10 所示。土工膜及土工格栅抗拉刚度取值见 Jamei 等[1]及 Qian 等[2]。显然衬垫的抗拉刚度对其变形影响很大，因而在填埋场衬垫设计时，须通过加筋使衬垫具有一定的抗拉刚度来抵抗下卧土体的局部沉陷。采用单层 LLDPE 土工膜的衬垫形式由于其抗拉刚度较小，难以抵抗较大尺寸的下卧土体沉陷，在填埋场设计中应慎用。对于同一衬垫形式沉陷区衬垫的环向应变和径向应变在沉陷中心达到最大且相等，而在其它位置，径向应变均大于环向应变。沉陷区不同位置的径向应变相差不大。

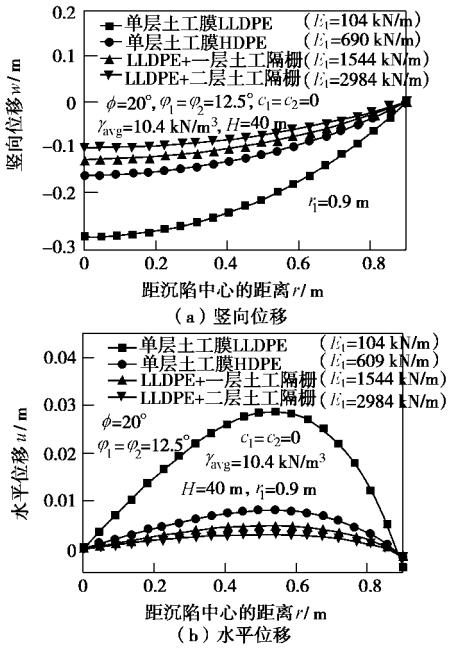


图 9 不同衬垫形式的沉陷区位移

Fig. 9 Displacement of liner in subsidence area for different liner systems

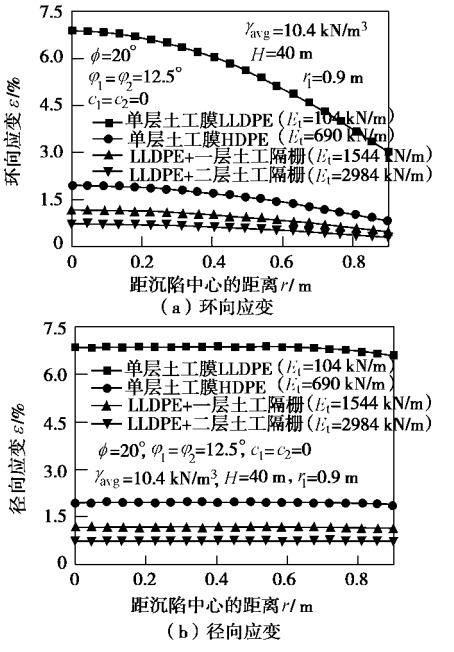


图 10 不同衬垫形式的沉陷区应变

Fig. 10 Strain of liner in subsidence area for different liner systems

3　工程设计方法及实例分析

3.1 工程设计方法

Giroud 等[3]首先提出了衬垫系统的抗局部沉陷设计方法，其计算公式形式简单、应用方便，但却较难用于验算已有衬垫形式的抗沉陷能力。前文已给出了衬垫抗沉陷能力的计算方法，同时按以下步骤进行抗局部沉陷设计。

（1）假定膜的允许应变 ε_g，按 Qian 等[2]的建议取 7%。

(2)在上覆土体及沉陷尺寸给定的条件下调节衬垫的抗拉刚度 E_t，使衬垫的最大应变达到允许应变 ε_g，同时计算衬垫的张拉力 $T=\sigma_r t$ 及衬垫的最大张拉力 T_{max}。

（3）考虑长期效应的衬垫最终强度 $T_{ult}=T_{max}RF_{CR}\ RF_{ID}RF_{CBD}$。其中，$RF_{CR}$ 为考虑荷载长期效应的折减系数，一般取 2.0～2.5；RF_{ID} 为考虑施工引起的折减系数，一般取 1.1～1.5；RF_{CBD} 为考虑生物化学腐蚀引起的折减系数，一般取 1.1～1.2[2]。

3.2　工程实例分析

某山谷型填埋场，为了利用空间进行卫生填埋和满足日益增长的垃圾产量需要，拟在老填埋场上再竖向扩建 40 m。其预可行性方案的横截面如图 11 所示，由于老填埋场采用垂直防渗系统，因而在进行竖向扩建时，需在扩建堆体底部增设水平防渗系统，以降低填埋场渗滤液水头高度并保护周围环境。根据覆盖系统和中间衬垫系统的沉陷状况不同，需要分别进行设计以满足其强度和变形要求。

（1）覆盖系统抗沉陷设计

覆盖层设计厚度为 1.2 m，自下而上分别为碎石导排层，厚度 0.3 m；重度 $\gamma_s=18$ kN/m³；自然黏土植被保护层，厚度 0.9 m，重度 $\gamma_n=18$ kN/m³。按 3.1

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

节的设计步骤分别分析了在滑动区不同衬垫界面强度和不同沉陷半径下沉陷区衬垫的允许内力，如图 12、13 所示。计算结果同 Grioud 等[3]设计结果进行了比较，由于 Grioud 等[3]方法假定衬垫应变处处相等，因而它只能计算衬垫的允许张拉力 T_{allow}。比较发现 Grioud 等[3]设计方法偏保守，Finey 等[4]同样也发现了这一结果。从图 13 还可以发现沉陷半径的大小对衬垫的张拉力影响很大，因而合适的沉陷半径选取对衬垫的防沉陷设计非常重要。

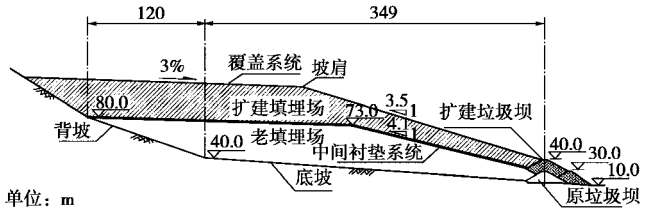


图 11 竖向扩建填埋场剖面图

Fig. 11 Cross section of a vertically expanded landfill

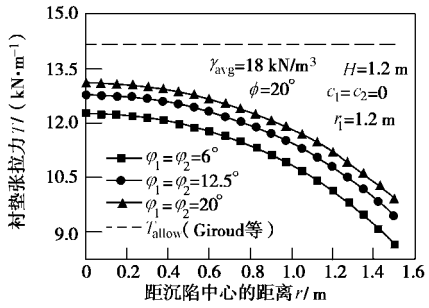


图 12 不同衬垫界面有效内摩擦角下覆盖层衬垫系统张拉力

Fig. 12 Allowable tension of coving system for different effective internal friction angles of liner interface

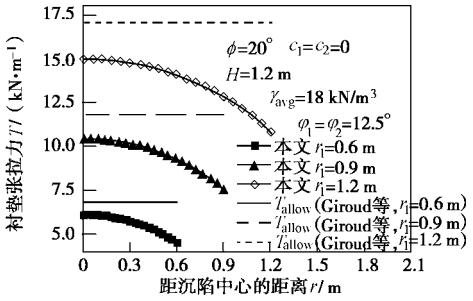


图 13 不同沉陷半径下覆盖层衬垫系统张拉力

Fig. 13 Allowable tension of coving system for subsidence with different radii

根据国内外文献[2, 8]，设计沉陷半径 r_1 通常取为 0.9 m，由于覆盖系统中土工合成材料所处环境一般较中间和底部衬垫系统理想，因而考虑适中的安全系数：$T_{\text{ult}} = T_{\max} RF_{\text{CR}} RF_{\text{ID}} RF_{\text{CBD}} = 10.4 \times 2.2 \times 1.3 \times 1.15 = 34.2$ kN/m。一层 1.5 mm 厚 HDPE 土工膜即可基本满足抗沉陷要求。

(2)新老填埋场交界处中间衬垫系统抗沉陷设计

新老填埋场交界处中间衬垫系统的主要功能是阻止扩建填埋场中的渗滤液向老场及周围环境中扩散。衬垫上覆土体自下而上分别为：压实黏土层，厚度 1 m，重度 $\gamma_{\text{n}} = 18$ kN/m^3；碎石导排层，厚度 0.3 m，重度 $\gamma_{\text{s}} = 18$ kN/m^3；垃圾堆体，厚度 40 m，重度 $\gamma_{\text{sw}} = 10.4$ kN/m^3。不同沉陷半径下中间衬垫的张拉力如图 14 所示。同样选择沉陷半径 $r_1 = 0.9$ m，由于由于中间衬垫系统所处环境较为恶劣，考虑较大的安全系数：$T_{\text{ult}} = T_{\max} RF_{\text{CR}} RF_{\text{ID}} RF_{\text{CBD}} = 16.2 \times 2.5 \times 1.5 \times 1.2 = 72.9$ kN/m。

根据计算，衬垫系统中土工膜、GCL 等土工合成材料自身的强度不足以满足抗沉陷要求，可采用一层强度合适的土工格栅进行加筋保护。

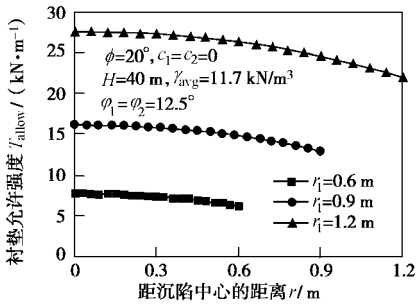


图 14 不同沉陷半径下中间层衬垫的允许强度

Fig. 14 Allowable tensile of middle liner for subsidence with different radii

4 结 语

本文将下卧土体局部沉陷条件下的复合衬垫系统分为滑动区和沉陷区建立了其受力变形分析模型，进行了迭代求解，并提出了适用于工程的衬垫抗沉陷设计方法。利用所提分析模型分析了滑动区衬垫界面强度，衬垫上覆土体的厚度、重度、有效内摩擦角及不同衬垫结构形式对衬垫受力变形的影响，并结合某填埋场扩建工程对其覆盖系统和中间衬垫进行了抗沉陷设计方法。利用所提分析模型分析了滑动区衬垫界面强度，衬垫上覆土体的厚度、重度、有效内摩擦角，及不同衬垫结构形式对衬垫受力变形的影响，并结合某填埋场扩建工程对其覆盖系统和中间衬垫进行了抗沉陷设计，得出以下结论及建议。

(1) 经典的 Giroud 工程设计方法仅建立了下卧土体沉陷条件下衬垫系统允许应变和允许张拉力之间的半经验关系，它可以方便地用于衬垫抗沉陷设计，然而难以验算已有衬垫的抗沉陷能力。另外，由于其半经验关系本身的缺陷及没有考虑滑动区的影响，其计算结果偏保守。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（2）参数分析显示：上覆土体厚度、重度及有效内摩擦角对衬垫受力变形的影响很大；由于土拱效应的影响，当上覆土体厚度及有效内摩擦角较大时，衬垫的受力变形受其影响将有限。衬垫结构的刚度越大，则其抵抗沉陷的能力也就越强。未加筋的 LLDPE 土工膜衬垫形式的抗拉刚度较小，难以抵抗较大尺寸的下卧土体沉陷，因而在填埋场设计中应慎用。

（3）按本文模型计算，覆盖系统采用用于防渗的 1.5mm 厚 HDPE 土工膜可基本满足抗沉陷设计要求，而对于填埋场扩建时的中间衬垫系统需增设一层强度合适的土工格栅用于加筋以抵抗下卧土体的沉陷。

（4）实际衬垫系统有一定的厚度且组成复杂，将其简化为单层膜分析可能造成一定的误差，其厚度及各组成部分之间相互作用的影响有待进一步的数值及试验研究。

参考文献：

[1] JAMEI M, VILLARD P, ZAGHOUANI K, et al. Prevent of risk due to karstic cavities detected in a recent motorway in Tunisia using geotextiles [C]// Proceedings 8ICG. Geosynthetics, 2006: 809－812.

[2] QIAN X D, KOERNER R M, GRAY D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction[M]// Upper Saddle River, N J: Prentice Hall, 2002.

[3] GIROUD J P, BONAPARTE R, BEECH J F, et al. Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1990, **9**(1): 11－50.

[4] FINLEY C A, HOLTZ R D. Investigation and modeling of two composite landfill covers[J]. Geosynthetics International, 2001, **8**(2): 97－112.

[5] KUO S S, DESAI K, RIVERA L. Design method for municipal solid waste landfill liner system subjected to sinkhole cavity under landfill site[J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2005, **9**(4)**:** 281－291.

[6] 钱伟长, 王志忠, 徐尹格, 等. 圆薄膜中心部分受均布荷载产生的对称变形[J]. 应用数学和力学, 1981, **2**(6): 599－612. (QIAN Wei-chang, WANG Zhi-zhong, XU Yin-ge, et al. The symmetrical deformation of circular membrane under the action of uniformly distributed loads in its central portion[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1981, **2**(6): 599－612. (in Chinese))

[7] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1943: 69－76.

[8] SL/T225—98 水利水电工程土工合成材料应用技术规范[S]. 1998. (SL/T225 — 98 Standard for application of geosynthetics in hydraulic and hydro-power engineering[S]. 1998. (in Chinese))

《岩土地震工程学》一书介绍与评价

在 1995 年 Steven L. Karamer 编著出版《Geotechnical Earthquake Engineering》(岩土地震工程学)和 2002 年 Robert W. Day 编著出版《Geotechnical Earthquake Engineering Handbook》（岩土地震工程手册）之后，我们十分高兴地看到了由陈国兴教授编著的我国第一部岩土地震工程的专著《岩土地震工程学》于 2007 年由科学出版社出版。

该书介绍了地震学和地震工程与岩土工程相关的基本知识，内容包括：强地震观测，地震动的随机过程、工程特性和人工合成，地震烈度与地震动参数的关系，反应谱，计算与应用等方面，阐述了地震动特性；通过土的动应力应变的黏弹塑模型、等效线性动黏弹模型、动弹塑性模型以及动剪切模量和阻尼比的估计等内容论述了土的动力本构关系；从共振柱试验、动三轴试验、土层波速试验和地脉动试验等方面介绍了目前国内常用的土动力学参数试验测定的原理、设备和方法；以水平成层场地和横向非均匀场地为例，系统论证了场地地震反应的分析方法以及深软场地的地震效应；基于国内外大量的试验与分析研究成果，论述了饱和黏性土动强度和饱和砂土的震动液化特性以及液化势和确定性经验判别方法、概率分析方法、神经网络模型判别方法和场地液化势的综合判别方法；总结归纳了土体地震永久变形的计算方法，包括有限滑动体位移法、整体变形法、随机反应分析法和地基震陷计算方法、深软场地上桩箱基础高层建筑和特大型桥梁群桩基础的地震效应分析方法以及土－结构相互作用对 TMS 减振控制影响的试验研究成果；通过震害实例、工程实例和大型振动台试验结果，阐述了地铁区间隧道、车站等地下结构的地震反应分析方法、地铁车站震害成灾机理以及地铁地下结构对周围场地设计地震动的影响；最后系统介绍了均质土坝和非均质土坝地震反应的剪切梁法、土坝地震稳定性评价的简化分析法和动力分析法。

目前，我国正处于基础设施工程、重大工程和城乡建设的高峰时期，政府和社会普遍高度重视工程安全和防灾减灾问题，这本专著的出版可谓是逢机应时，雪中送炭。它为从事岩土工程防震减灾研究、试验、勘察、设计和城乡规划、工程建设规划的专业技术人员以及相关专业的研究生提供了急需的专业参考书和教科书。我相信，基于这本专著所传播的岩土地震工程理论与技术的知识，将对我国岩土工程震害预防和人才培养发挥重要的作用。

（中国地震局兰州地震研究所　王兰民　供稿）

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net