

HDPE 土工膜端部张拉力的大规模实测数据分析

许四法, 杨 杨

(浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 垃圾填埋场边土工膜主要受到温度应力和垃圾压缩引起的张拉力的作用, 为评价垃圾填埋场防渗系统中高密度聚乙烯(HDPE)土工膜的温度应力和垃圾填埋压缩引起的端部张拉力, 以短纤维无纺布、HDPE 土工膜组成防渗系统, 进行大规模现场试验。试验结果表明: 伴随环境温度的下降, HDPE 土工膜中产生温度应力, 当埋埋高度较小时作用在 HDPE 土工膜端部的张拉力主要为温度应力; 随着埋埋高度的增加, 压缩引起的 HDPE 土工膜端部张拉力增大。用有限元算法对压缩引起的端部张拉力进行分析, 并采用温度与 HDPE 土工膜张拉力的关系对温度应力进行分析。计算结果与实测结果的对比情况表明, 考虑埋埋压缩引起的张拉力的应力松弛后计算结果更加接近实测结果。

关键词: 土力学; 大规模试验; 温度应力; 张拉力; 有限元分析; 应力松弛

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增2 - 4343 - 05

ANALYSIS OF RESULTS OF LARGE-SCALE TESTS ON TENSILE FORCE OF HDPE GEOMEMBRANE PLACED ON SIDE SLOPE IN LANDFILL

XU Sifa, YANG Yang

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310032, China)

Abstract: The forces at the shoulder of geomembrane placed on the side slope as liner system in landfill are mainly temperature stress and tensile force due to waste compaction. In order to evaluate the temperature stress and tensile forces of high density polyethylene(HDPE) geomembrane in the liner system, which is composed of HDPE geomembrane and non-woven geotextile, the large-scale tests were conducted. The results show that the temperature stress within the HDPE geomembrane occurs with decrease of circumstantial temperature; the tensile force at the shoulder of HDPE geomembrane is mainly temperature stress when the height of soil is low; the tensile force of HDPE geomembrane by compaction work increases with the increase of height of soil. The tensile forces of HDPE geomembrane due to waste compaction are analyzed by finite element method; and the temperature stresses are analyzed by the relationship between temperature and the stress, the comparison shows that the calculation results considering stress relaxation of tensile force are closer to the test values.

Key words: soil mechanics; large-scale tests; temperature stress; tensile force; finite element analysis; stress relaxation

1 引 言

垃圾在堆放和填埋过程中由于发酵、雨水淋刷

和地表水浸泡而产生渗滤液; 垃圾焚烧灰中含有多种重金属、二恶英以及其他有害物质, 因降雨形成渗滤液^[1, 2]。渗滤液的成分复杂, 含有多种有害物质, 为了防止渗滤液流入地下污染地下水, 垃圾

收稿日期: 2006 - 09 - 25; **修回日期:** 2007 - 03 - 29

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y506230)

作者简介: 许四法(1967 -), 男, 博士, 2005 年于日本宇都宫大学能源环境专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事环境岩土工程方面的教学与研究。E-mail: xy20038@hotmail.com

填埋场中必须设置以土工膜为主的防渗系统。土工膜是一种高分子材料,较为常用的是 HDPE(high density polyethylene)土工膜。HDPE 土工膜表面呈黑色,对外界温度很敏感,当两端被固定时伴随外界温度下降会产生很大的温度应力^[3]。同时伴随垃圾填埋压缩,由于垃圾与保护材料、保护材料与 HDPE 土工膜之间产生相对位移和摩擦应力^[4, 5],使 HDPE 土工膜中产生张力^[6]。因此,当基础没有沉降时垃圾填埋场中设置的 HDPE 土工膜主要承受着温度应力和垃圾压缩引起的张力。HDPE 土工膜在高应力长期作用下可能发生蠕变破坏^[7, 8],直接影响使用寿命^[9],同时 HDPE 土工膜端部的受力大小也决定了固定土工膜端部的混凝土的体积^[10],因此在设计时必须对土工膜的受力进行分析。关于 HDPE 土工膜的温度应力和伴随垃圾压缩引起的张力评价已有研究^[11~13],但是到目前为止,国内外的研究都是对单一的应力进行分析,没有对土工膜中作用的各种应力综合分析,特别是没有同时分析土工膜所受应力中占主要部分的温度应力和张力。

本文首先介绍在某垃圾填埋场实测得到的 HDPE 土工膜温度、垃圾填埋高度和应力关系,而后对 HDPE 土工膜的温度应力和垃圾填埋压缩引起的端部张力进行分析。

2 大规模试验

2.1 试验概况

在实际垃圾填埋场边制作了一个高为 5 m、边坡坡比为 1:1.5、底面宽度为 5 m 的模拟垃圾填埋场(见图 1)。边坡和底面都铺设了上部无纺布、HDPE 土工膜以及下部无纺布作为防渗系统,防渗系统下部基础进行了加固处理,可认为没有变形沉降。试验中从安全和方便考虑,采用杂填土代替垃圾,采用碾压机械进行碾压,碾压控制指标为土的容重为 16.0 kN/m³。填埋分 10 d 完成(10 个阶段),每天铺设厚度为 0.5 m。

填埋从每天下午 1 点开始到下午 4 点结束。通过拉力和温度传感器计测土工膜端部张拉力和土工膜表面温度。试验中为了解温度下降时 HDPE 土工膜下端部的位移情况,在图 1 的点 A 处设置了位移计。

2.2 材料特性

上部和下部无纺布采用的是单位面积质量为 800 g/cm²、厚为 10 mm 的短纤维无纺布,HDPE 土

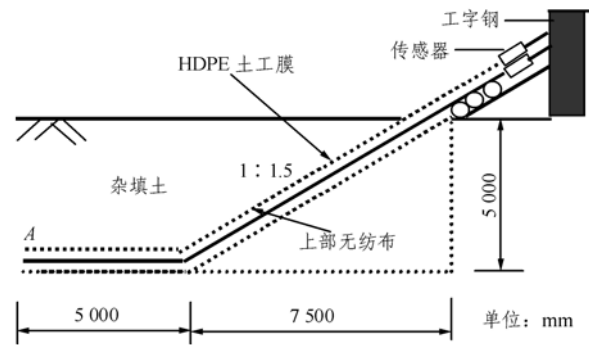


图 1 试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental cross-section

工膜的厚度为 1.5 mm,破坏强度为 34.2 MPa。室内试验测得 HDPE 土工膜的线膨胀系数为

$$\beta = (0.017 \ 6t + 1.599) \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中: t 为温度。

HDPE 土工膜是一种黏弹性材料,割线模量对环境温度很敏感。根据室内试验,HDPE 土工膜的 1%割线模量与温度的关系式为

$$E_{1\%} = 10^{-0.010 \ 2t} E_0 \quad (2)$$

式中: E_0 为 0 °C 时 HDPE 土工膜的弹性模量。

试验中采用杂填土代替垃圾作为回填物,杂填土的自然含水率为 15.0%,最大粒径为 2 mm,其粒径分布如图 2 所示。

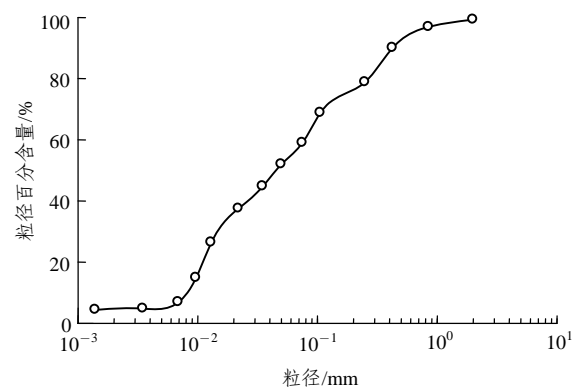


图 2 土的粒径分布

Fig.2 Graining distribution curve of soil

3 试验结果

试验结果由两部分组成,即填埋压缩引起的端部张拉力和温度下降产生的温度应力。第 1 天从下午 1 点固定 HDPE 土工膜上部后开始填埋,伴随着厚 0.5 m 土的填埋碾压,HDPE 土工膜的端部

张拉力增大; HDPE 土工膜是一种对温度特别敏感的高分子材料, 试验中土工膜表面温差达 30 °C~45 °C(见图 3), 在 HDPE 土工膜的上端部被固定于槽钢, 另一端被土重量固定的情况下, 伴随环境温度下降产生温度应力, 图 4 清楚地显示了开始填埋后几小时内 HDPE 土工膜端部张拉力急剧增加, 这主要是温度应力的作用。即使填埋碾压结束后, 由于环境温度的下降, HDPE 土工膜的端部张拉力继续增加。例如, 填埋开始 3 h(下午 4 点)后, 第 1 层 0.5 m 的土填埋完成, 此时 HDPE 土工膜的端部张拉力为 0.23 kN/m, HDPE 土工膜表面温度为 52.5 °C, 到晚上 7 点, HDPE 土工膜表面温度降为 23.5 °C, 虽然填土厚度没有变化, 但 HDPE 土工膜端部张拉力提高到 1.78 kN/m, 比填埋刚完成时增加了 1.55 kN/m。此后温度虽有波动但变化不大, 基本在 23.0 °C 左右, 因此端部张拉力也变化不大。第 1 层填埋 17 h(即第 2 天早上 6 点)后, 随着环境温度的升高, HDPE 土工膜表面温度也升高, HDPE 土工膜端部张拉力下降。

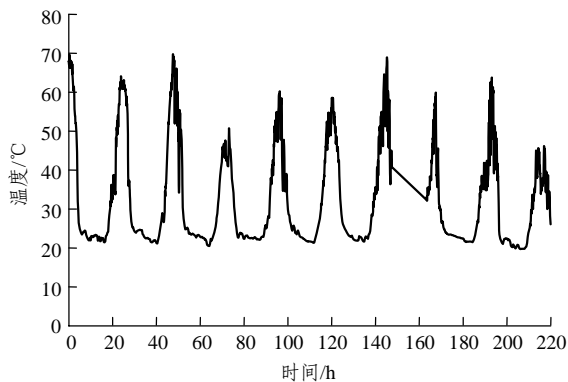


图 3 时间与温度关系

Fig.3 Relation between time and temperature

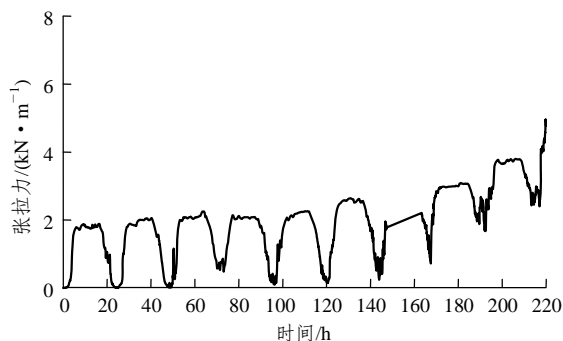


图 4 时间与张拉力关系

Fig.4 Relation between time and tensile force

总体来看, 随着填埋高度增加, HDPE 土工膜端部张拉力增大, 其增量与填埋高度及环境温度的

变化有关。例如, 填埋到第 7 天(即第 7 阶段), 由于最低环境温度为 33.0 °C, 比其他填埋阶段高出近 10.0 °C。因此, HDPE 土工膜端部最大张拉力较小。

4 应力分析方法

4.1 温度应力

HDPE 土工膜的两端被完全固定不能自由伸缩, 因此当环境温度由 t_a 变化到 t_b 时, HDPE 土工膜中产生的应力为

$$\sigma = -\int_{t_a}^{t_b} 10^{-\alpha} \beta E_0 dt = \frac{\beta E_0}{2.30} (e^{-2.30\alpha}) \Big|_{t_a}^{t_b} \quad (3)$$

式中: α 为弹性模量的温度变化系数。

4.2 填埋压缩引起的端部张拉力

采用有限元算法分析填埋压缩引起的端部张拉力。上层短纤维无纺布与 HDPE 土工膜的端部被完全固定, 在高度方向假设填土能自由变位(见图 5)。材料界面之间采用平面四节点接触单元。

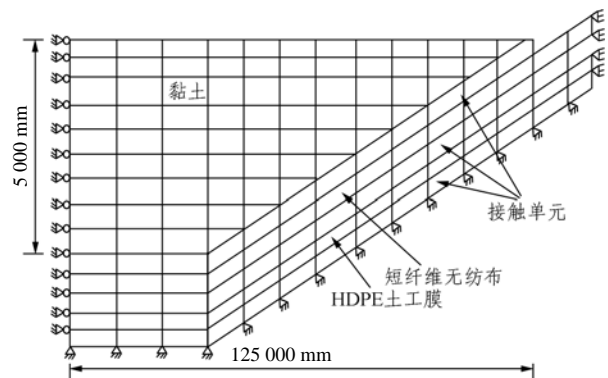


图 5 计算模型

Fig.5 Calculating model

4.2.1 材料参数

杂填土的初始容重为 16.0 kN/m³, 内摩擦角为 31.0°, 应力-应变关系采用 Duncan-Chang 非线性本构模型^[14], 割线模量表达式为

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 k P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (4)$$

式中: σ_1 , σ_3 分别为最大, 最小主应力; R_f 为破坏比; P_a 为大气压力; c , φ 分别为土的黏聚力和内摩擦角; k , n 均为由试验确定的参数。

HDPE 土工膜和短纤维无纺布的 1% 割线弹性模量分别为 784.0(0 °C)和 6.4 MPa。

4.2.2 界面特性

通过直接剪切试验获得的杂填土与短纤维无纺

布、短纤维无纺布与 HDPE 土工膜的摩擦角 φ 和黏聚力 c 分别为 33.4° 和 4.5 kPa 以及 11.2° 和 0.66 kPa 。

5 计算结果

5.1 计算值与实测值比较

根据埋埋高度的不同，数值计算分为 10 种情况。从图 6 中可以看出，伴随埋埋高度的增加，土壤埋埋压缩引起的 HDPE 土工膜端部张拉力也随之提高，从第 1 天的 0.12 kN/m 到最后 1 d 埋埋结束后的 5.97 kN/m ，增加了近 50 倍，说明埋埋高度对 HDPE 土工膜端部张拉力影响很大。

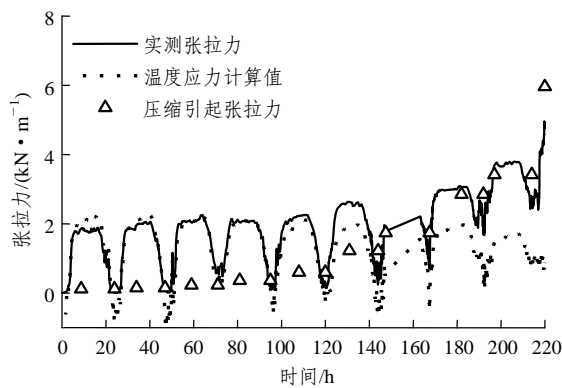


图 6 计算与实测结果比较

Fig.6 Comparison of calculation and test results

试验中没有观测到 HDPE 土工膜下端部点 A 处变位，表明符合式(3)的使用条件(即两端固定)。因此，利用式(3)计算得到伴随环境温度变化的 HDPE 土工膜温度应力。比较图 6 中的计算结果与图 3 发现，当 HDPE 土工膜表面温度达到最大值时，由于土工膜膨胀变长端部张拉力变小，甚至为负值。图 6 中也清楚地显示了当填土高度不大时，HDPE 土工膜端部张拉力主要是温度应力，随着高度增加埋埋压缩引起的端部张拉力逐渐变大，甚至超过环境温度变化引起的张拉力。

温度应力与压缩引起的端部张拉力之和即为 HDPE 土工膜的端部张拉力，把每个阶段填土完成后的最大温度应力和最小温度应力与数值计算得到的端部张拉力相加，得到图 7 所示的结果。与试验中测得的端部张拉力相比较发现，不管是在最高还是最低温度，计算得到的端部张拉力几乎都大于实测值，计算值为实测值的 1.1~1.6 倍。

开始埋埋的第 1, 2 天最高温度接近或超过固定 HDPE 土工膜时的温度，使得 HDPE 土工膜膨胀变柔软，而此时填土高度又不大埋埋压缩引起的端部

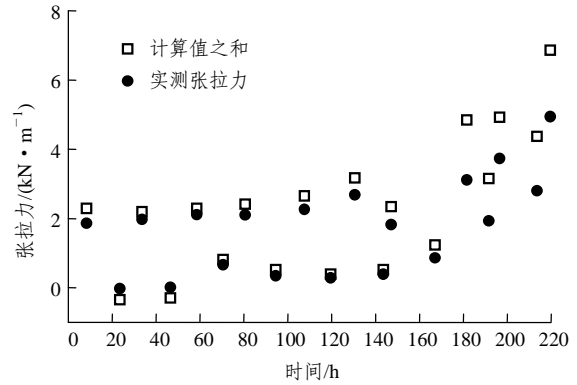


图 7 计算与实测结果比较

Fig.7 Comparison of calculated and test results

张拉力比较小，因此测得的端部张拉力为 0，而根据温度变化值计算得到的端部张拉力为负值，所以计算值小于实测值。

5.2 修正计算值

由以上分析可知，随着埋埋高度的增加，计算值与实测值之比有增大趋势，即计算值偏离实测值。HDPE 土工膜是一种典型的黏弹性材料，在一定的张拉力作用且保持不变的情况下，会发生应力松弛现象，而计算中没有考虑应力松弛，因此随着埋埋高度的增加计算值逐步偏离实测值。

HDPE 土工膜温度应力随环境温度的变化而变化，不是一个固定值，因此很难对此应力松弛现象进行分析，而埋埋压缩引起的端部张拉力在同一阶段都相同，所以这里对压缩引起的端部张拉力作应力松弛分析。

采用图 8 所示的弹簧与沃伊特串联而成的应力松弛力学模型，则应力与时间的关系^[15]为

$$\sigma_t = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \varepsilon_0 + \frac{E_1^2}{E_1 + E_2} \varepsilon_0 e^{-\frac{E_1 + E_2}{\eta} t} \quad (5)$$

式中： E_1 为某阶段埋埋开始时的弹性模量，且 $E_1 = \sigma_0 / \varepsilon_0$ ； E_2 为下阶段埋埋开始前的弹性模量，且 $E_2 = \sigma_\infty E_1 / (\varepsilon_0 E_1 - \sigma_\infty)$ ； ε_1 为弹簧的应变； ε_2 ， η 分别为沃伊特模型的应变和黏性系数。

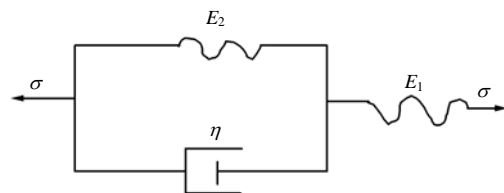


图 8 应力松弛力学模型

Fig.8 Mechanical model of stress relaxation

考虑填埋压缩引起的端部张拉力松弛现象后, 对比图 7 和 9, 除去上面提到的几个特殊点即最高温度接近或超过固定 HDPE 土工膜时的温度点, 可明显看出其余计算值更接近实测值, 计算值与实测值之比从原来的 1.1~1.6 变为 0.95~1.20, 计算精度大大提高。

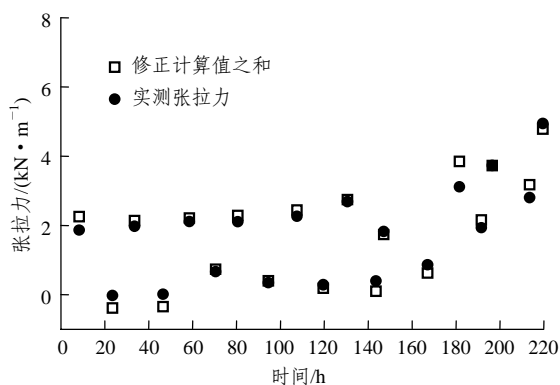


图 9 修正计算值与实测结果比较

Fig.9 Comparison of modified calculation and test results

6 结 论

垃圾填埋场中作为防渗材料使用的 HDPE 土工膜端部张拉力, 主要由环境温度变化和垃圾填埋压缩引起, 本文通过大规模试验研究了 2 种张拉力随环境温度和填埋高度变化的规律, 当填埋高度较小时作用在土工膜端部的张拉力主要为温度应力。随着填埋高度的增加, 垃圾压缩引起的张拉力增大。同时, 对温度应力和填埋压缩引起的 HDPE 土工膜端部张拉力进行分析, 计算结果与大规模实测值基本相符。更进一步的分析中利用应力松弛的评价方法, 对填埋压缩引起的 HDPE 土工膜端部张拉力的应力松弛现象进行了分析, 使计算值更接近实测值。

参考文献(References):

[1] 李国鼎. 环境工程手册——固体废物污染防治卷[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.(LI Guoding. Environmental engineering handbook—volume of prevention of solid waste[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.(in Chinese))

[2] BOU-ZEID E, EI-FADEL M. Parametric sensitivity analysis of leachate transport simulations at landfills[J]. Waste Management, 2004, 24(3): 681 - 689.

[3] SCHMACHTENBERG E, SCHOECHE N. Advances in calculating thermally induced stresses in nonlinear viscoelastic materials[J]. Polymer Engineering and Science, 1999, 39(4): 767 - 777.

[4] BRIANCON L, GIRARD H, POULAIN D. Slope stability of lining systems-experimental modeling of friction at geosynthetic interfaces[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, 20(3): 147 - 172.

[5] DIXON N, JONES D R V, FOWMES G J. Interface shear strength variability and its use in reliability-based landfill stability analysis[J]. Geosynthetics International, 2006, 13(1): 1 - 14.

[6] KODIKARA J. Analysis of tension development in geomembranes placed on landfill slopes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000, 18(1): 47 - 61.

[7] MERRY S M, BRAY J D, YOSHITOMI S. Axisymmetric temperature- and stress-dependent creep response of new and old HDPE geomembranes[J]. Geosynthetics International, 2005, 12(3): 156 - 161.

[8] KRISHNASWAMY R K. Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high density polyethylene(HDPE) pipes[J]. Polymer, 2005, 46(25): 11 664 - 11 672.

[9] PEGGS I D, SCHMUCKER B, CAREY P. Assessment of maximum allowable strains in polyethylene and polypropylene geomembranes[C]// Geotechnical Special Publication, Geo-Frontiers. [S. l.]: [s. n.], 2005: 3 487 - 3 502.

[10] HULLINGS D F, SANSONE L J. Design concerns and performance of geomembrane anchor trenches[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997, 15 (4/6): 403 - 417.

[11] AYA T, NAKAYAMA T. Influence of environmental temperature on yield stress of polymers[J]. JSME International Journal(Series A), 1997, 40(3): 343 - 348.

[12] IMAIZUMI S, KAWAMATA K, TSUBOI M. Study on thermal stress within the geomembrane liner induced by temperature decrease[C]// Proceedings of the 7th International Landfill Symposium. [S. l.]: [s. n.], 1999: 115 - 122.

[13] MOONKYUNG C, MINWOO S, KANGSUK K, et al. Protective effect of overlying geosynthetic on geomembrane liner observed from landfill field tests and inclined board laboratory experiments[J]. Waste Management and Research, 2006, 24(3): 250 - 259.

[14] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soil[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970, 96(SM5): 1 629 - 1 654.

[15] XU S F, IMAIZUMI S. Experimental study on the stress relaxation properties of a liner sheet[J]. Geosynthetics Engineering Journal, 2002, 17(1): 63 - 70.