

HDPE 膜的力学特性受损伤影响初步研究

徐光明¹ 章为民¹ 彭功勋²

(1. 南京水利科学研究所土工研究所 ,江苏 南京 210024 ; 2. 河海大学岩土工程研究所 ,江苏 南京 210098)

摘要 :为分析某一现代卫生填埋场边坡上铺设的高密度聚乙烯膜(HDPE 膜)因施工损伤而引发的断裂机制 ,开展了条带拉伸试验和土工离心模型试验 .拉伸试验测试了无损膜和 4 种情形损伤膜试样 ,发现损伤 HDPE 膜受力达到峰值强度并被拉长至一定程度后 ,其拉伸变形不再在整个试样长度范围内均匀发生 ,而主要集中在受损部位发生 ,故实测到的损伤膜极限伸长率仅为无损情形时的 1/10 左右 .这一影响实际上改变了 HDPE 膜的破坏机制 ,使其由原先的渐进性破坏变成受损后的突发性破坏 .两组初步离心模型试验结果发现 ,在轻质高压缩性的模型 MSW 作用下 ,模型膜上的损伤明显扩大 ,受损部位的拉伸变形十分明显并接近断裂 ,表明损伤对膜的实际工作性状有很大影响 .
关键词 垃圾填埋场 ;HDPE 膜 ;城市固体填埋物(MSW) ;拉伸试验 ;极限伸长率 ;损伤 ;土工离心模型试验

中图分类号 :TU41 ;X705 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2004)01-0076-05

对现代卫生填埋场来说 ,高密度聚乙烯(HDPE)土工防渗膜是一种优点和缺点都很突出的衬垫材料^[1] . HDPE 膜的优点为 :具有良好的防渗性能 ,渗透系数小于 1.0×10^{-12} cm/s(表 1) ;对大部分化学物质有抗腐蚀能力 ;具有良好的机械和焊接特性 ;可制成各种厚度(0.5 ~ 3.5 mm) ;不易老化 .然而 ,其突出的缺点是 ,对双向拉力的承受能力非常低 ,具体表现为承受不均匀沉陷的能力较差 ,耐穿刺的能力较差 .我国南方某城市的 1 座现代卫生填埋场采用了一种厚 2 mm、表面粗糙的 HDPE 膜(表 1) ,施工时 ,先整平填埋场边坡 ,铺设无纺布垫层 ,再铺设此膜 .膜上设有亚粘土保护层 ,保护层上铺砂垫层 .有一单元投入使用后 ,在城市固体填埋物(MSW)受力作用下 ,坡顶处的 HDPE 膜发生大面积断裂^[1] .后经调查发现 ,在断裂处 HDPE 膜上有一串由上至下沿斜坡的穿孔 ,为碎石子从坡顶滚落所致 .

表 1 HDPE 膜的物理力学性能指标
Table 1 Physical and mechanical properties of HDPE geomembrane

厚度 /mm	密度 (g·cm ⁻³)	极限抗拉强度 (N·mm ⁻¹)	屈服抗拉强度 (N·mm ⁻¹)	极限伸长率 /%	屈服伸长率 /%	弹性模量 /MPa	渗透系数 (cm·s ⁻¹)
2.0	0.94	≥50	≥36	≥700	≥13	≥600	≤2.2 × 10 ⁻¹⁴

注 :厚度、密度、极限抗拉强度、屈服抗拉强度、极限伸长率、屈服伸长率、弹性模量、渗透系数的检验标准分别是 :ASTMD1593 ,ASTMD1505 ,ASTMD638 ,ASTMD638 ,ASTMD638 ,ASTMD638 ,ASTMD638 ,ASTME96 .

根据许多学者对 MSW 物理力学特性所做的研究 ,发现 MSW 的压缩性和沉降不均匀性比一般粘土高得多 ,在自重作用下 ,MSW 沉降的典型值约为其层厚的 15% ~ 30%^[2] ,这将在边坡产生很大的下曳拉力作用于 HDPE 膜上 ,引起膜的拉伸 ,局部区域拉伸应变可能很高 .如果 HDPE 膜本身存在缺陷或损伤 ,并且又正好位于高拉伸应变区域 ,损伤部位及其周围的防渗膜内就难免应力集中继而导致更高的拉伸应变 .这一案例中的穿孔损伤正好发生在坡顶高应变受力区 ,此处 HDPE 膜中拉伸应变可能远远高于无损部位的拉伸应变 .

基于这一分析 ,笔者首先开展室内抗拉强度试验 ,测试了对折损伤、单孔损伤和单孔损伤与边缘缺陷并存以及多孔损伤 4 种情形下损伤对 HDPE 膜力学特性的影响 ,并在此基础上开展了两组初步土工离心模型试验 .

1 损伤对 HDPE 膜拉伸特性的影响

此次开展的条带拉伸试验仍采用原型 HDPE 膜,无损试样共有 3 种规格:标准试样为 50 mm(夹长)×50 mm(宽度),长条试样为 100 mm×50 mm 和宽条试样为 50 mm×200 mm,从中可以比较分析出试样规格对拉伸测试结果的影响.4 种情形损伤试样规格为标准、长条、宽条以及宽长条(100 mm×200 mm)(图 1),它们是采用对折和钻孔方法来制作的.对于多孔损伤情形,孔间距为 25 mm,窄试样中心有双孔损伤,宽试样有 8 孔损伤.图 2 是典型拉伸力与拉伸应变关系曲线.表 2 给出了这些试样的规格(包括损伤试样的损伤和发展描述)、极限抗拉强度(T_{ult})、屈服伸长率(ϵ_y)、极限伸长率(ϵ_{ult})和拉伸模量(E)特征指标.

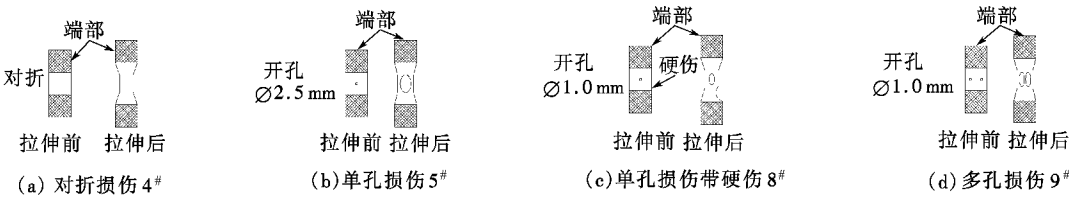


图 1 各种损伤情形(HDPE 膜)

Fig.1 Simulation of different kinds of damage(HDPE geomembrane)

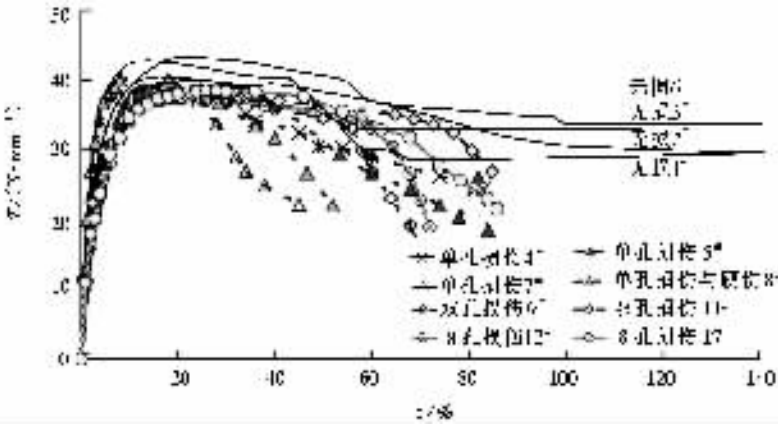


图 2 无损试样和损伤试样的拉伸特性(HDPE 膜)

Fig.2 Tension load against tension strain of damaged and undamaged HDPE geomembrane samples

表 2 不同损伤情形 HDPE 膜的拉伸试验结果

Table 2 Comparison of tensile test results of HDPE geomembrane samples under different kinds of damage

编号	长×宽 /mm ²	损伤情形	破坏时损伤特征	T_{ult} ($N \cdot mm^{-1}$)	ϵ_y /%	ϵ_{ult} /%	E /MPa
1 [#]	100×50	无 损		40.3	16	> 700	670
2 [#]	50×50	无 损		39.7	20	> 700	790
4 [#]	50×50	对 折		39.0	16	82	460
5 [#]	50×50	单孔 $\varnothing 2.5$ mm	椭圆长 40 mm,宽 24 mm	39.0	14	90	500
6 [#]	50×200	无 损		43.2	22	650	380
7 [#]	50×50	单孔 $\varnothing 1.0$ mm	椭圆长 45 mm,宽 25 mm	38.0	12	44	670
8 [#]	50×50	单孔 $\varnothing 1.0$ mm 边带硬伤	椭圆长 25 mm,宽 12 mm; 硬伤成裂口,长 33 mm	40.0	8	52	830
9 [#]	50×50	双孔 $\varnothing 1.0$ mm	2 个椭圆长 28 mm,宽 13 mm	37.4	21	85	470
11 [#]	100×50	双孔 $\varnothing 1.0$ mm	2 个椭圆长 30 mm,宽 15 mm	37.4	20	70	480
12 [#]	100×200	8 孔 $\varnothing 1.0$ mm	8 个椭圆,中间大,两端小	37.3	18	72	410
17 [#]	50×200	8 孔 $\varnothing 1.0$ mm	8 个椭圆,中间大,两端小	38.5	26	86	500

1.1 无损 HDPE 膜的拉伸特性

3 种不同规格无损试样的单位宽度拉力与拉伸应变曲线具有相近的特征(图 2),都是一开始拉力随伸长量迅速增长,很快屈服而达到峰值强度,拉力减小到一定程度后逐渐趋于稳定,之后伸长量继续发展而拉力

基本维持不变.对照表 1 中厂家给出的 HDPE 膜的力学指标 ,可以发现重新试验测得的指标与其大致相同 : 极限抗拉强度为 39.7 ~ 43.2 N/mm ,屈服伸长率为 16% ~ 22% ,极限伸长率约 650% ~ 800% ,拉伸模量为 670 ~ 790 MPa(宽条试样 6# 拉伸模量为 380 MPa ,夹口处有一夹伤).

1.2 损伤 HDPE 膜的拉伸特性

从图 2 可以看到 4 种损伤情形 HDPE 膜试样的拉伸曲线开始段与无损试样并无区别 ,但这些拉伸曲线在峰值点以后有明显跌落 ,在破坏前没有出现一个稳定平缓的过渡性直线段.仔细观察后发现 ,损伤样受力达到峰值强度并被拉长至一定程度后 ,损伤(特别是损伤孔)迅速扩大 ,试样有效受力宽度和厚度骤然缩减 ,致使膜很快断裂 ;也就是说 ,损伤膜的拉伸变形主要集中在受损部位 ,并不是在整个试样长度范围内均匀发生.这也许是上述案例中的 HDPE 膜上一串损伤孔引发大面积断裂的真正机制.

4 种情形损伤试样的力学特征指标归纳为 :极限抗拉强度为 37.3 ~ 40.0 N/mm ,其平均值为无损试样的 96%(对折和单孔损伤)和 94%(多孔损伤),屈服伸长率为 8% ~ 26% ,极限伸长率为 45% ~ 90%(该值仅为无损试样极限伸长率的 1/10 左右),拉伸模量为 410 ~ 670 MPa.从拉伸特性看 ,如果说无损 HDPE 膜试样的破坏是渐进性的 ,那么 ,一个缺少平缓过渡阶段的损伤 HDPE 膜试样的破坏 ,可以说是突发性的.

2 无损膜和损伤膜的离心模型试验

为了模拟原型填埋场 MSW 大变形条件并观察这种条件下损伤对 HDPE 膜工作性状的影响 ,在南京水利科学研究所 NH—50 g·ton 中型土工离心机上完成两组离心模型试验.

2.1 模型相似律和模型膜的选择

如图 3 所示 ,防渗膜工作性状与下列因素有关 (a) 填埋场边坡的坡度 α (b) MSW 的填埋厚度或坡高 H (c) MSW 的密度 ρ (d) 反映 MSW 变形特性的等效变形模量 E_{MSW} (e) HDPE 膜的极限拉伸强度 T_{ult} (f) 防渗膜与 MSW 之间的摩擦系数 μ (g) 反映防渗膜损伤状况的等效孔径 e ; (h) 加速度 a ,对于原型 $a = g$ ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) ,对于离心模型 $a = r\omega^2$,这里 r 为模型有效半径 , ω 为转动角速度.

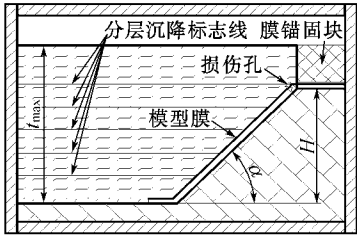


图 3 模型布置
Fig.3 Layout of model

通过量纲分析 ,可导出 5 个无量纲数 :

$$\{ \alpha , E_{MSW} / (\rho a H) , T_{ult} / (\rho a H^2) , \mu , e / H \} \tag{1}$$

模型相似条件就是式(1)中的 5 个无量纲数在模型和原型中对应相等 ,即

$$\alpha_m = \alpha_p \tag{2}$$

$$(E_{MSW} / (\rho a H))_m = (E_{MSW} / (\rho a H))_p \tag{3}$$

$$(T_{ult} / (\rho a H^2))_m = (T_{ult} / (\rho a H^2))_p \tag{4}$$

$$\mu_m = \mu_p \tag{5}$$

$$(e / H)_m = (e / H)_p \tag{6}$$

式(2)规定了模型和原型边坡坡度应相同 ,式(5)和式(6)规定了模型膜和原型膜与 MSW 的摩擦系数应相同 ,以及损伤程度的相似性.离心模型试验的一条重要准则是模型与原型在几何对应点处的应力水平完全相同^[3] ,即 $(\rho a H)_m = (\rho a H)_p$,设模型几何比例尺 $H_m / H_p = 1 / N$ (下标 m 和 p 分别代表模型和原型) ,同时控制模型与原型 MSW 的密度相同 ,压缩变形特性相同 ,即 $\rho_m = \rho_p$, $E_{MSW,m} = E_{MSW,p}$,因此得

$$a_m = (\rho_m / \rho_p)^{-1} (H_m / H_p)^{-1} a_p = N a_p = N g \tag{7}$$

$$T_{ult,m} = (\rho_m / \rho_p)^{-1} (a_m / a_p)^{-1} (H_m / H_p)^{-2} T_{ult,p} = N (1 / N)^{-2} T_{ult,p} = T_{ult,p} / N \tag{8}$$

式(8)规定了模型膜和原型膜的抗拉强度应满足的相似比例^[3]. 试验选择了一种厚 0.017 mm 的低压聚乙烯膜作模型膜(表 3) ,它的极限抗拉强度为原型 HDPE 膜的 1/70. 由于模型膜表面较光滑 ,为了满足式(3) ,在膜表面沿横、竖两个方向等间隔(10 mm) 涂漆橡胶以增加表面糙度.模型膜与原型膜的拉伸应变之比为

$$\frac{\epsilon_m}{\epsilon_p} = \frac{[T_m / (1 \times t_m)] / E_m}{[T_p / (1 \times t_p)] / E_p} = \left(\frac{T_m}{T_p} \right) \left(\frac{E_m t_m}{E_p t_p} \right)^{-1} = \frac{1}{N} \left(\frac{E_m t_m}{E_p t_p} \right)^{-1} \tag{9}$$

式中 : t ——膜厚 ; T ——膜单位宽度所承受的拉力 ,故 $T_m = T_p / N$. 根据式(5) ,就所选择的这种模型膜(表

3) ,当模型几何比例尺为 1/80、设计加速度为 80*g* 时 ,可满足模型膜与原型膜中的拉伸应变相等 ,即 $\epsilon_m/\epsilon_p = 1$,故确定两组模型 $N = 80$.

表 3 两组模型参数
Table 3 Two groups of model parameters

模型	α ($^{\circ}$)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	t /mm	T_{ult} ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	E /MPa	$T_{\text{ult},m}/T_{\text{ult},p}$	ϵ_m/ϵ_p	ϵ_y /%	ϵ_{ult} /%	e/H
M3	45	800	0.017	0.575	870	1/70	1($N = 80$)	16	215	0
M4	45	800	0.017	0.575	870	1/70	1($N = 80$)	16	215	0.012

2.2 模型试验结果和分析讨论

笔者设计了两组离心模型试验 ,主要参数见表 3 ,它们的前 4 个无量纲数相同 ,第 5 个无量纲数 e/H 不同 .如图 3 所示 ,45 $^{\circ}$ 模型边坡高 250 mm ,它在 80*g* 时模拟了 20 m 高的原型填埋场 ,模型 MSW 为一种密度较轻而压缩性较高的木屑混合土 ,采用分层压实法制备 ,两组模型填筑密度相同(表 3) ,故它们的变形模量相同 ;模型 M3 为无损膜($e = 0$) ,模型 M4 为多孔损伤膜($e = 3$ mm ,间距为 25 mm) ,受损部位在坡顶处 .作为初步的离心模型试验 ,主要观测模型膜和 MSW 在试验中和停机后的性状和沉降分布 .为此 ,在分层压实 MSW 时 ,每层均设有分层沉降标志线 ,如图 3 所示 .制备好的模型移置于离心机后 ,按每次 10*g* 逐级加速模型至设计加速度 .在试验过程中 ,主要通过闭路电视实时监测模型的总体变形发展 ,停机后测量各分层的沉降大小 .

2.2.1 损伤对模型膜工作性状的影响

试验结果发现 ,在 M4 边坡坡顶处模型膜上的小孔沿坡面方向向下位移了 5 mm 之多 ,孔径被拉长至 5 mm ,损伤孔周围膜上原先粘涂的硅橡胶也与膜发生了分离脱落 .这些迹象表明 ,受损部位的拉伸变形很大 ,即将发生断裂破坏 ,而铺设于 M3 边坡上的模型膜仍完好无损 .

2.2.2 模型 MSW 的沉降变形

图 4 给出了两组模型填埋区的分层沉降分布 ,它们的沉降量和分布基本相同 .从下往上的位移标志线所记录的沉降量逐渐递增 ,换算至原型尺寸 ,上下两条位移标志线所界定的 4.0 m 厚 MSW 平均压缩了 0.4 m ,相对压缩量达 10% 左右 .另外 ,同一深度处发生的沉降 ,位置愈靠近填埋场边坡其沉降值愈小(图 4) .由于损伤使得 M4 模型膜连同膜上的 MSW 与边坡垫层间的错动量有所增加 ,故 M4 中靠近边坡 MSW 的沉降比 M3 中的略大 .

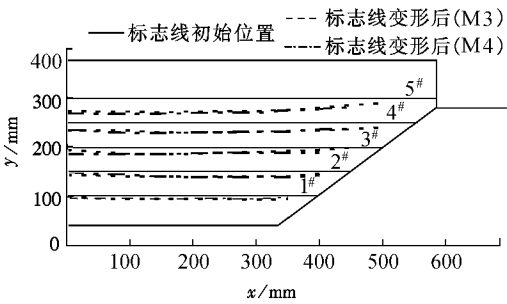


图 4 无损膜(M3)与损伤膜(M4)填埋区分层沉降分布比较

Fig.4 Comparison of stratified settlement of undamaged geomembrane(M3) and damaged geomembrane(M4) burial regions

3 结 语

a. 条带拉伸试验结果发现 ,损伤 HDPE 膜受力达到峰值强度并被拉长至一定程度后 ,其拉伸变形不再在整个试样长度范围内均匀发生 ,而主要集中在受损部位发生 ,实测到的损伤膜极限伸长率仅为无损情形时的 1/10 左右 ,这一影响实际上改变了 HDPE 膜的破坏机制 ,使其由原先的渐进性破坏变成受损后的突发性破坏 .

b. 两组初步离心模型试验结果发现 ,在轻质高压缩性的模型 MSW 作用下 ,模型膜上的损伤明显扩大 ,受损部位的拉伸变形十分明显并接近断裂 ,而完好模型膜在 MSW 作用下仍完好无损 ,表明损伤对膜的实际工作性状有很大影响 .

参考文献:

- [1] 王汉强, 龙燕. 城市生活垃圾现代卫生填埋场设计中几个问题的探讨[A]. 见: 包承纲, 陈云敏主编. 第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002. 115—121.
- [2] 钱学德, 郭志平. 城市固体废弃物 MSW 的工程性质[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 1—6.
- [3] MITCHELL J K, JABER M, SHEN C K. Behavior of reinforced soil walls in centrifuge model tests[A]. In: CORTE J F, eds. Proceedings of the International Conference Centrifuge 88[C]. Rotterdam: Balkema A A, 1988. 259—271.

Effect of damage on mechanical behavior of HDPE geomembrane

XU Guang-ming¹, ZHANG Wei-min¹, PENG Gong-xun²

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

2. Geo-technical Research Institute of Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: For investigation of the failure mechanism of the HDPE geomembrane on the slope of a newly constructed landfill, which is related to a series of small boreholes during the construction, tensile tests and geotechnical centrifuge model tests are carried out on the intact and damaged HDPE geomembranes as well as their simulants. Four kinds of damages to the HDPE geomembrane are simulated by folding of the membranes, drilling of holes through the membranes, and combination of boreholes and defects remaining on the edge of the samples. It is found from the tensile tests that, when the tension load of the damaged geomembrane reaches its ultimate value, the load drops abruptly, and that the development of the tension strain concentrates in damaged parts. As a result, the ultimate ratio of elongation of the damaged HDPE geomembrane is much less than that of the intact HDPE geomembrane, only about one-tenth. Two preliminary centrifuge tests show that, under the large MSW settlement condition, holes on the simulant geomembrane at the top of the slope move a certain distance from their original positions downward the lined slope, their diameters enlarge twice, and silicone glue begins to be detached from the geomembrane, registering an impending rupture of the damaged geomembrane.

Key words: waste landfill; HDPE geomembrane; municipal solid waste (MSW); tensile test; ultimate ratio of elongation; damage; geotechnical centrifuge model test