

卫生填埋场室内离心模拟试验研究

彭功勋,施建勇

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 用离心试验法模拟了填埋体的沉降和边坡土工膜的应力应变状态,并将其与有限元计算结果进行了对比.结果表明,该方法可以定性地描述出卫生填埋场现场的状况.边坡土工膜存在初始损伤的情况下发生的应力集中是导致其受拉破坏的主要原因,保证边坡防渗层安全的关键是加强现场管理与监督,提高土工膜铺设工艺.

关键词 卫生填埋场;土工膜;应力应变状态;离心模拟试验

中图分类号 :TU411.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2003)02-0171-04

土工防渗层的安全是卫生填埋场建设中的关键问题.填埋体在沉降过程中将对铺设在填埋场边坡上的土工防渗层形成‘拖拽’作用,使防渗层中的土工膜承受拉应力.当拉应力足够大或土工膜自身存在缺陷时,可能导致土工膜的拉伸破坏^[1,2].为此,笔者以某卫生填埋场为例,采用室内离心模拟试验与有限元计算相结合的方法对其 HDPE 土工膜大面积拉断破坏问题进行研究.考虑到卫生填埋场的平面几何特征及对称性,将其简化成平面应变问题.离心模拟试验共制作了 7 组模型(M1 ~ M7),并在 M3 的模拟土工膜上人工产生初始损伤,以研究土工膜在损伤状态下的工作性态.通过研究,揭示了边坡土工膜发生拉断破坏的主要原因,得到了模拟垃圾土的沉降量和模拟土工膜的拉应变,并把它们与各自的计算值进行了比较.

1 离心模拟试验

1.1 模型设计原理

模拟试验需满足相似律条件.土工现象的离心模型相似律可以从控制方程和量纲分析两种角度分别导出.由于本例难以建立 HDPE 土工膜破坏的控制方程,因此采用量纲分析法确定模型相似律.

HDPE 防渗膜主要为拉断破坏,与此相关的物理变量及其量纲见表 1.

表 1 与 HDPE 膜拉断破坏有关的物理变量及其量纲

Table 1 Physical variables related to tensile failure of HDPE geomembrane and their dimensions

变量	防渗膜的单宽 抗拉强度 T_{ult}	膜与土之间的 摩擦系数 μ	坡角 α 或 其正切值 $\tan\alpha$	填埋物的 深度或坡高 H	膜上填埋物的 湿密度 ρ	惯性 加速度 a
量纲	MT^{-2}	1	1	L	ML^{-3}	LT^{-2}

其中 a 在原型中为重力加速度,在模型中为离心加速度.当模型的有效离心半径为 r ,旋转角速度为 ω 时,可按下式计算模型的离心加速度:

$$a = r\omega^2 = ng \tag{1}$$

式中 n 为离心加速度比,定义为 $n = a/g$.

由表 1,根据量纲分析原理,可导出无量纲变量 $\mu, \tan\alpha, \frac{T_{ult}}{\rho a H^2}$. 而根据模型相似律要求,当且仅当所有的无量纲变量在模型和原型中对应相等时,则模型和原型完全相似,即

$$\mu_m = \mu_p \tag{2}$$

$$(\tan\alpha)_m = (\tan\alpha)_p \tag{3}$$

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

若已知模型与原型间几何比尺为 N_1 , 并且保持模型与原型土体的密度相同, HDPE 土工膜和模拟膜的单宽抗拉强度之比为 N_2 , 则

$$H_p = N_1 H_m \quad (\rho_p = \rho_m) \tag{5}$$

$$T_{ult,p} = N_2 T_{ult,m} \tag{6}$$

将式(5)、(6)代入式(2), 得

$$a_m = \left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right) \left(\frac{H_p}{H_m}\right)^2 \left(\frac{T_{ult,m}}{T_{ult,p}}\right) a_p = N_1^2 \frac{1}{N_2} a_p = \frac{N_1^2}{N_2} g \tag{7}$$

因此, 当 $N_1 = N_2 = N$ 时, 为满足模型相似律, 离心加速度水平 n 应达到 N , 即有

$$a_m = N a_p = N g \tag{8}$$

由于土工膜受到的应力基本上都沿坡向分布, 泊松比对其受力状态不会有显著影响, 故认为式(3)自然成立. 所以, 只要离心加速度设计值满足式(7)或式(8), 相同坡角的原型和模型之间即满足相似律要求.

1.2 材料选取

试验使用了粘土、土工布、塑料薄膜和木屑土 4 种材料, 其中粘土和土工布来自现场. 用于模拟 HDPE 土工膜的是两种塑料薄膜, 分别记为 S1 薄膜和 S2 薄膜. 两种模拟膜与 HDPE 膜的单宽强度之比 N_2 分别为 1/70 和 1/25. 用于模拟垃圾土的木屑土由锯木屑和高液限粉土按一定比例拌和而成, 使之与现场垃圾土密度一致, 即 $\rho_m = \rho_p$. 由于拌和体积及均匀性难以精确控制, 各模型的木屑土密度略有差异.

考虑到离心机的实际设计加速度水平, 用 S1 膜和用 S2 膜的模型的离心加速度水平 n 均取为 80, 即离心加速度为 $80g$. 由于模型与原型的尺寸比约为 1/80, 即用 S1 膜的模型完全满足相似律的条件是 $n = 91.5$. 因此, 在 $n = 80$ 时, 用 S1 薄膜的模型基本上能满足相似律要求, 可以根据其试验结果判断原型 HDPE 土工膜的应力状态与安全性. 而用 S2 膜的模型虽然不满足式(2), 但是, 由于 S2 膜比较厚, 可粘贴应变片以研究膜内的应变分布, 故本文根据用 S2 膜的模型的试验结果来判断 HDPE 膜内的应变状态.

1.3 模型制作

试验共制作了 7 组模型, 分别记为 M1 ~ M7. 图 1 为离心试验模型示意图. 模型箱的内尺寸为: 长 $\times$ 宽 $\times$ 高 = 685 mm $\times$ 350 mm $\times$ 475 mm. 模型 M1 ~ M3 采用 S1 薄膜, 模型 M4 ~ M7 采用 S2 薄膜.

模型制作过程为: 按最优含水率(23%)配置好粘土; 取 21.6 kg 粘土自试验箱底部铺设, 铺平击实, 击实厚度约 5 cm; 把表面切毛以防止形成层间薄弱界面. 继续铺同量土, 铺平、击实、切毛. 在铺设第 3 层粘土时, 先把模拟土工膜和土工布一端锁固在试验箱右侧; 再向上分层铺设粘土, 铺平、击实、切毛, 直至土体厚度达到 29 cm. 然后按预定坡角切削出粘土边坡, 抹平表面, 坡顶保留宽度 10 cm, 坡底保留厚度 4 cm. 依次翻盖上土工布、模拟土工膜. 从坡底向上逐层铺设木屑土, 每层厚约 5 cm, 在层间靠观察屏一侧埋设一条黑色标志物. 每层木屑土在铺设前称重. 铺好后, 测得木屑土的总体积, 并依此计算出木屑土的实际平均密度 ρ_m .

另外, 在模型 M3 坡顶处 S1 薄膜上钻了一排直径 3 mm 的小孔, 与边坡走向平行, 孔间距 25 mm. 在 S2 薄膜上则沿坡面按 10 cm 间隔等距布置了 4 组大量程应变片 P1 ~ P4, 应变数据由计算机自动采集.

模型制作好后, 把试验箱置入离心试验机, $10g$ 一级逐级施加荷载, 直到离心加速度达到预定的 $80g$. 从加载到停机、试验箱静止的全过程进行了录像.

1.4 试验数据处理

由计算机实时采集 S2 膜的应变量. 离心机停机后测量木屑土的沉降量. 木屑土在停机之后有相当大的回弹. 根据录像显示, 其沉降回弹量约占总沉降量的 10%. 因此, 实际沉降量约为静止测量值的 1.1 倍.

根据相似律要求, 模拟土工膜承受的单宽拉力 T_m 和原型 HDPE 膜承受的单宽拉力 T_p 之比应为 $1/n$. 通

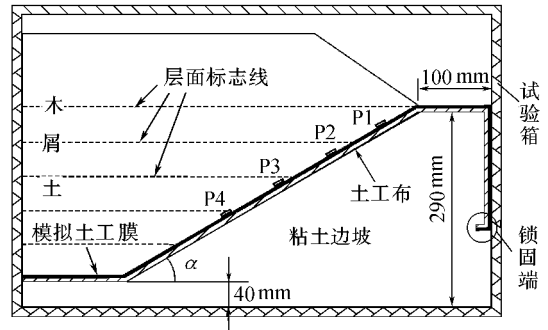


图 1 离心试验模型剖面

Fig.1 Section of centrifugal model

过拉伸试验测得 S2 薄膜的弹性模量 $E_{m2} = 330 \text{ MPa}$,该膜的厚度 $t_m = 0.18 \text{ mm}$ 而 HDPE 土工膜的弹性模量 $E_p = 600 \text{ MPa}$,厚度 $t_p = 2 \text{ mm}$. 因此,

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} = \frac{\frac{\sigma_m}{E_m}}{\frac{\sigma_p}{E_p}} = \frac{\frac{1 \times t_m}{T_p} \frac{E_p}{E_m}}{\frac{T_p}{1 \times t_p}} = \frac{T_m}{T_p} \frac{E_p t_p}{E_m t_m} = \frac{1}{n} \times 20.2 \approx \frac{1}{4}$$

(9)

也就是说,离心模型 M4 ~ M7 测得的 S2 膜的应变的 4 倍就是原型 HDPE 土工膜相应位置上的应变值.

由于试验中木屑土是填埋到顶后逐级施加离心力的,而现场垃圾土是逐层填埋、同时逐级加载的^[3],因此,模型的沉降量不能真正反映现场垃圾体的沉降量. S2 膜中的应变值与现场 HDPE 膜中的应变值也并非一一对应,但 S2 膜中的应变值仍能基本反映出 HDPE 膜变形的大小.

2 试验结果及其与有限元计算结果的比较

2.1 S1 薄膜的变化

试验结束后,M1 和 M2 模型中的 S1 薄膜无显著变化或损伤,但 M3 模型的 S1 薄膜在卸荷静止后,小孔沿坡面拉长量的残余值有 5 mm,孔径也扩大到了 5 mm 而加载期间应略大些. 由前述知,完全满足相似律时,离心加速度水平 n 为 91.5,比试验实际施加的 n 值大,亦即现场原型 HDPE 土工膜的危险程度比模型中 S1 薄膜的高些. 因此,当现场 HDPE 膜内存在初始损伤时,极有可能最终发生破坏.

2.2 试验沉降量与计算值的比较

如图 1 所示,为防止高出坡顶的木屑土向右侧塌落,试验时在坡顶上加了块木块 而计算中并无此限制,从而使得木屑土表面沉降的实测值和计算值之间无法进行比较. 因此,本文仅对离底面 20 cm,即略低于坡顶处的木屑土沉降量的实测值和计算值进行比较. 计算采用的是由河海大学岩土工程研究所基于邓肯-张模型原理编写的 BCF 比奥固结有限元程序^[4].

图 2 显示了 M4 ~ M7 4 个模型沉降量的实测值和计算值,两者吻合较好.

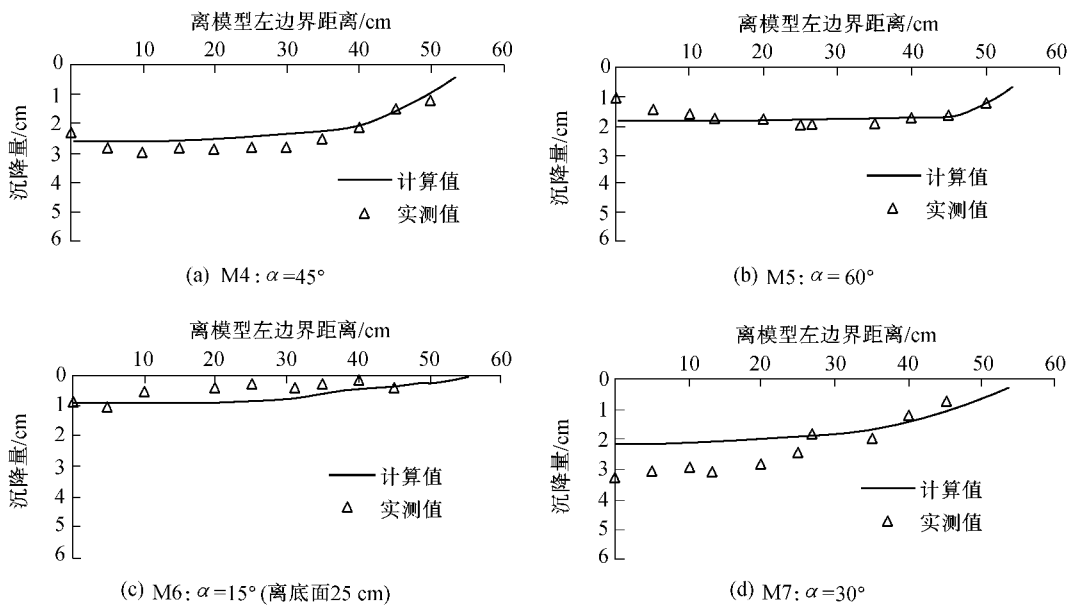


图 2 木屑土沉降试验值与计算值的比较

Fig.2 Comparison of measured and calculated settlements of sawdust soil

2.3 模拟土工膜内应变试验值和计算值的比较

由于模拟土工膜产生的应变值相当大,而应变片量程有限,因此,试验时 M4 ~ M7 4 组模型的应变片 P1 均很快被拉坏而未采集到数据,另有部分应变片也因发生破坏而未采集到数据. 只有在 P3 处,不同坡角的 4 组模型均采集到了数据. 计算表明,该处的拉应变值相对较小,15°和 30°坡角时该处的拉应变接近 S2 薄膜内的最小拉应变值.

图 3 显示了在 P3 处 S2 薄膜拉应变的试验值和计算值随坡角的变化关系。S2 薄膜刚度较小,应变片粘贴工艺精度较难把握,应变片自身可能对 S2 膜的变形产生影响,其他一些系统和人为因素也可能对其产生一些影响,由此势必使试验值出现一定的误差。因此,虽然图 3 中的试验值和计算值并不完全吻合,但仍足以说明 BCF 比奥固结有限元程序在本问题研究中的有效性。

虽然试验测得的应变值残缺不全,但多数应变片被拉坏的事实表明,HDPE 膜将产生相当大的拉应变。

3 结 论

- a. 通过室内离心模拟试验研究填埋场边坡土工膜的应力应变状态是可行的,但试验应严格满足相似律。
- b. 研究填埋场边试验表明,在该卫生填埋场建设中,如果土工膜在初始时刻完好无损,应当不会发生应力集中导致的拉断破坏,但是,当膜中存在初始损伤时,土工膜是相当危险的。因此,加强现场管理与监督,提高土工膜铺设工艺水平,保证其完好无损,是保证边坡防渗层安全的关键。试验测得的木屑土沉降量及模拟土工膜的应变值,均能和 BCF 比奥固结有限元程序的计算结果较好地相互验证。这说明用 BCF 比奥固结有限元程序计算易压缩性类土体的沉降变形基本有效。
- c. 由于离心模拟试验加载过程与卫生填埋场垃圾体的实际加载过程不一样,试验结果不能完全反映出现场情况。但该方法仍能用来定性描述现场状况,其试验数据还可用来判定某计算方法在分析固体废弃物填埋问题中的有效性。

参考文献：

[1] MESSNER H, ABEL K. Stresses in landfill liner slopes as a result of waste displacements [A]. In : PINTO Pedro Sêco e, eds. Environmental Geotechnics [C]. Balkema : Rotterdam Publishing Company, 1998. 139—144.

[2] 钱学德, 郭志平, 施建勇, 等. 现代卫生填埋场的设计与施工 [M]. 北京 : 中国建筑工业出版社, 2001. 44—49.

[3] GOURC J P, THOMAS S, VUILLEMIN M. Proposal of a waste settlement survey methodology [A]. In : PINTO Pedro Sêco e, eds. Environmental Geotechnics [C]. Balkema : Rotterdam Publishing Company, 1998. 195—200.

[4] 姜弘道. 水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序 [M]. 南京 : 河海大学出版社, 1992. 305—316.

Laboratory centrifugal simulation experiment on landfill

PENG Gong-xun, SHI Jian-yong

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract : The settlement of wastes and the stress and strain status of geomembranes on a landfill slope were simulated by centrifugal experiments, and the results were compared with those of FEM calculation. It is indicated that the present method can give a qualitative description of the status of the landfill, and that the main reason for tensile failure of geomembranes is the concentration of stresses caused by the initial damage to membranes. Therefore, the strengthening of field management and supervision and improvement of paving technique are vital to the safety of impervious layers

Key words : landfill ; geomembranes ; stress and strain status ; centrifugal simulation experiment

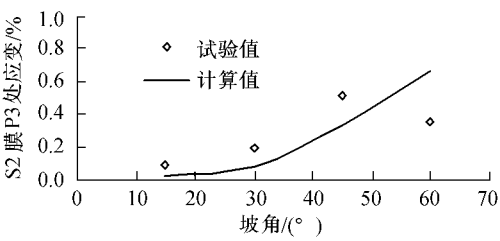


图 3 拉应变与边坡坡角的关系

Fig.3 Strain of S2 membrane vs. angle of slope