

LDPE 土工膜液胀极限荷载的工程仿真实验

束一鸣¹, 叶乃虎²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510170)

摘要: 现有土工膜液胀安全的设计方法一般均以土工膜的单向拉伸强度为依据, 通过理论简化、经验或半经验公式进行复核计算。鉴于有必要通过作各种工况(包括各种孔径和各种厚度等)下的 PE 膜液胀试验进行实验室的液胀极限荷载工程仿真, 分析归纳出液胀极限荷载与 PE 膜厚度、支持层孔径之间的关系, 供工程设计的复核计算所用, 以尽量减免重复繁杂的液胀试验。

关键词: LDPE 土工膜; 液胀极限荷载; 工程仿真

中图分类号: TU531.7

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2003)05-0001-03

土工膜作为水利水电等工程散粒体结构的防渗材料, 若垫层(支持层)材料是土体(即土和砂), 其安全主要体现在随结构变形和施工损伤等方面; 若土工膜的垫层为粗粒石料, 例如碎石、卵石、砾石等, 颗粒之间的孔隙使土工膜在水压力作用下产生液胀变形, 土工膜处于其平面内各向张拉变形的受力状态。若土工膜受较高水头作用, 可能使土工膜达到液胀顶破强度, 此时土工膜液胀强度成为土工膜运行期安全的控制因素。

现有土工膜液胀安全的设计方法一般均以土工膜的单向拉伸强度为依据, 通过理论简化、经验或半经验公式进行复核计算^[1], 此处不再赘述。实际上, 较为合理的结果应该通过做各种工况(包括各种孔径和各种厚度等)下的液胀试验并进行液胀状态(膜内各向受力)应力应变分析求得。长期以来, 液胀破试验包括规范推荐的试验方法, 都是在某一固定孔径的圆孔夹具上做液胀破试验, 此时的成果多用于不同规格土工膜材料之间液胀极限荷载的比较, 而对于实际工程可能存在各种大小尺寸孔径下的受张拉状态的模拟只能逐个通过繁复的实验去实现。

在实验室通过工程仿真模拟, 求得不同厚度的土工膜处于不同孔隙上的液胀极限荷载, 暂时避开难以测定的液胀强度, 不仅对土工膜液胀安全的合理设计, 而且对这种设计的易于实现均具有积极意义。

1 工程仿真的室内实验

1.1 颗粒孔隙概化模拟

实际工程中, 土工膜的粗颗粒垫层(支持层)的

形状各异, 但对于形状浑圆的卵石、砾石(包括各向尺度较为均衡的碎石)颗粒之间形成空隙的孔径, 将以其等效粒径进行概化描述, 已有许多文献涉及这些描述, 本文建议以支持层的特征粒径 d_{85} 作为分析依据, 即可能由 4 枚粒径尺度接近 d_{85} 的颗粒之间形成的空隙的孔径 d 为: $d = d_{85}/2.4$, 以 d 作为支持层中可能出现的空隙的设计孔径。

1.2 液胀模拟试验方法

钢模具的圆孔孔径分别为 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, 选工程中常用的 LDPE 土工膜, 厚度分别为 0.2 mm, 0.35 mm, 0.5 mm, 每一种厚度做 3 个试样, 取其均值。

参照文献[2]的试验方法, 水压荷载采用抗渗仪加载, 为模拟工程实际, 加压方式采用分级慢速加压法, 即每加一级荷载(膜厚度大、孔径小时以 100 kPa 为一级荷载; 其他以 50 kPa 为一级荷载), 持续 8 h, 直至试样胀破。试样液胀变形采用水准仪与标尺量测, 如图 1 所示。

2 试验分析

图 2 为以 LDPE 膜厚度 t 为参数、慢速加载的胀破压力(液胀极限荷载) P 与支持层孔径之间 D 的关系曲线, 关系式为

$$0.2 \text{ mm LDPE 膜} \quad P = 871.46 D^{-1.053} \quad (1)$$

$$0.35 \text{ mm LDPE 膜} \quad P = 1191.7 D^{-0.9904} \quad (2)$$

$$0.5 \text{ mm LDPE 膜} \quad P = 1786.5 D^{-0.8169} \quad (3)$$

为了得到土工膜厚度 t (mm)、支持层孔径 D (mm)、液胀极限荷载 P (kPa) 之间的关系, 可列出支

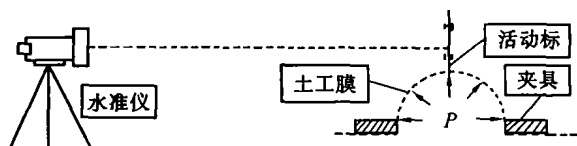


图1 液胀试验示意图

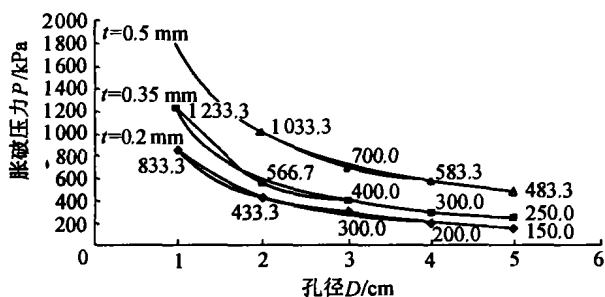


图2 t 为参数, P 与 D 关系曲线

持层孔径一定时,不同厚度 LDPE 膜对应的液胀极限荷载的关系式为式(4)~(7),关系曲线如图3所示。

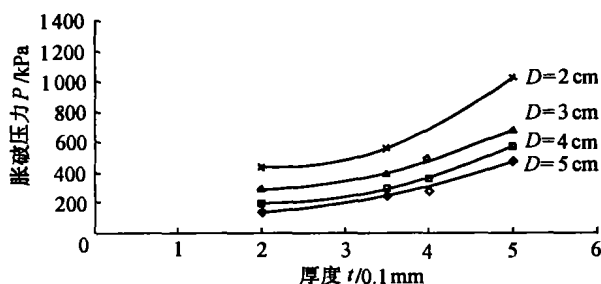


图3 D 为参数, t 与 P 关系曲线

$$D = 5 \text{ cm 时}, P_5 = 29.622t^2 - 96.26t + 224.02 \quad (4)$$

$$D = 4 \text{ cm 时}, P_4 = 40.733t^2 - 157.37t + 351.80 \quad (5)$$

$$D = 3 \text{ cm 时}, P_3 = 44.444t^2 - 177.78t + 477.78 \quad (6)$$

$$D = 2 \text{ cm 时}, P_2 = 74.044t^2 - 318.31t + 773.74 \quad (7)$$

上述式中 t 的单位为 0.1 mm, P 为 kPa。

为了推出 P, D, t 三者之间的关系,在式(1), (2), (3)的两边同时取自然对数得:

$$t = 0.2 \text{ mm} \quad \ln P = 6.77 - 1.053 \ln D \quad (8)$$

$$t = 0.35 \text{ mm} \quad \ln P = 7.083 - 0.9904 \ln D \quad (9)$$

$$t = 0.5 \text{ mm} \quad \ln P = 7.488 - 0.8169 \ln D \quad (10)$$

可以得到 $\ln P$ 与 $\ln D$ 之间的关系曲线为一直线,如图4所示。

根据图4又可以得到该直线斜率 k 与土工膜厚度 t 之间的关系曲线,如图5所示。根据图5可以得到 $k \sim t$ 的拟合方程:

$$k = 0.0264t^2 - 0.09381t - 0.964 \quad (11)$$

经过某点直线 $\ln P = f(\ln D)$ 的斜率可由图5中的曲线求得,例如经过点 $(\ln 5, \ln P_5)$ 的斜率为 k 的直线公式如下:

$$\ln P - \ln P_5 = k(\ln D - \ln 5)$$

$$\text{即} \quad P = P_5 \left(\frac{D}{5} \right)^k \quad (12)$$

将 k, P_5 代入式(12)得

$$P = (29.622t^2 - 96.256t + 224.02) \times \left(\frac{D}{5} \right)^{0.02464t^2 - 0.09381t - 0.964} \quad (13)$$

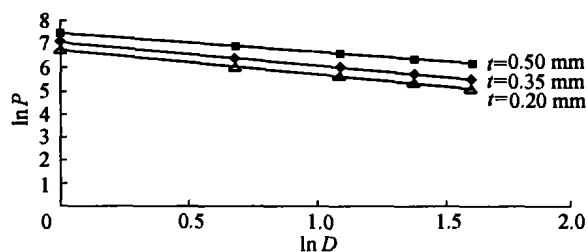


图4 $\ln P \sim \ln D$ 关系曲线

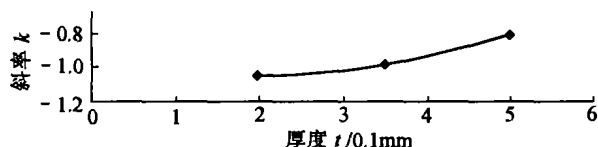


图5 斜率 k 与厚度 t 关系曲线

同理,可以分别用 $D = 4 \text{ cm}, D = 3 \text{ cm}, D = 2 \text{ cm}$ 三种情况下的拟合曲线推出 P 的公式。

由 $D = 4 \text{ cm}$ 时推出:

$$P = (40.733t^2 - 157.37t + 351.8) \times \left(\frac{D}{4} \right)^{0.02464t^2 - 0.09381t - 0.964} \quad (14)$$

由 $D = 3 \text{ cm}$ 时推出:

$$P = (44.444t^2 - 177.78t + 477.78) \times \left(\frac{D}{3} \right)^{0.02464t^2 - 0.09381t - 0.964} \quad (15)$$

由 $D = 2 \text{ cm}$ 时推出:

$$P = (74.044t^2 - 318.31t + 773.74) \times \left(\frac{D}{2} \right)^{0.02464t^2 - 0.09381t - 0.964} \quad (16)$$

在试验时由于受压力表量程上限的控制, $t = 0.5 \text{ mm}, D = 1 \text{ cm}$ 的情况未能测定。采用式(13)~(16)计算该情况的胀破压力可得 $P = 1800 \text{ kPa}$ 。可将 $t = 0.5 \text{ mm}, P = 1800 \text{ kPa}$ 加入到图3中去,得到 $D = 1 \text{ cm}$ 时的拟合曲线:

$$P_1 = 37.044t^2 + 62.922t + 559.28 \quad (17)$$

根据式(17)可推出一个胀破压力 P 的计算公式:

$$P = (37.044t^2 - 62.922t + 559.28) \times D^{0.02464t^2 - 0.09381t - 0.964} \quad (18)$$

用式(13)~(16)分别计算4种厚度的 LDPE 土工膜在不同的孔径时的液胀极限荷载,将计算值与实测值比较,计算相对误差:

$$s = \frac{P_s - P}{P} \times 100\% \quad (19)$$

式中: P_s 和 P 分别为膜液胀极限荷载的计算值和实

表1 式(14)计算的 LDPE 膜的液胀极限荷载值及与试验值的相对误差

膜厚 /mm	计算值/kPa					相对误差 $s/\%$				
	$D = 5\text{ cm}$	$D = 4\text{ cm}$	$D = 3\text{ cm}$	$D = 2\text{ cm}$	$D = 1\text{ cm}$	$D = 5\text{ cm}$	$D = 4\text{ cm}$	$D = 3\text{ cm}$	$D = 2\text{ cm}$	$D = 1\text{ cm}$
0.2	158.1	200.0	270.8	415.0	861.0	4.50	0	-9.73	-4.22	3.32
0.35	240.5	300.0	399.0	596.0	1184.2	-3.80	0	-0.25	5.17	-3.98
0.5	486.1	583.3	737.8	1027.6	1810.5	0.58	0	5.40	0.55	0.58

测值。

经比较,式(14)的精度高于其他公式,故此处仅列出由 $D = 4\text{ cm}$ 时 $P \sim t$ 曲线导出的式(14)的计算值及其与试验值的比较结果,见表1。由表1可见,采用公式(14)计算各种厚度 LDPE 膜在不同孔径下的液胀极限荷载值是基本合理的。

3 结 语

a. LDPE 膜在慢速加压时,不同厚度、不同孔径下的液胀极限荷载可按式(14)式计算。

b. 由于液胀强度直接与液胀应力应变有关,式(14)暂时避开了 LDPE 膜与液胀强度直接有关的液胀应力应变问题,以仿真实验方法解决工程实际应用问题。

c. 随着支持层孔径 D 变化,LDPE 膜的液胀极限荷载并不呈线性变化,而大致以乘幂形式变化。

d. 支持层孔径一定时,随着 LDPE 膜厚度的增加,液胀极限荷载基本上是以二次曲线的形式增加。

e. 仿真实验结果显示,LDPE 土工膜一般是沿横向形成一条缝破裂,这与 PVC 膜通常沿一点逐渐扩大破裂(一般为 PVC 膜上的薄弱点)的现象差异较大,这为破损缺陷渗流计算提供了依据。

参考文献:

- [1] SL/T225—98,水利水电工程土工合成材料应用技术规范[S].
- [2] 南京水利科学研究院.土工合成材料测试手册[M].北京:水利电力出版社,1991.115~123.

(收稿日期:2003-06-26 编辑:张志琴)

张光斗院士给编辑部的一封信

《水利水电科技进展》编辑部:

你们好!

贵刊 2003 年第 3 期裴源生等同志的文章《21 世纪初期中国灌溉发展战略》,提出了灌溉发展的指导思想和原则,农业灌溉发展战略及分区发展方向,以及主要灌溉发展战略措施:节水灌溉;南方管道化灌溉排水;推广集中供水,分散蓄水,扩大补水灌溉面积;井渠结合,地表水和地下水联合运用;结合当地水土资源条件,因地制宜发展灌溉。读后深受教益。

实施这些战略和措施,需要大量投资和科学技术。文中提出建立合理的水价管理机制,来促使农民实施这些战略和措施。看来这是不现实的,因为农民一少资金,二缺科学技术。实施这些战略和措施,需要各级水利机构帮助农民勘测规划,向政府立项,筹集资金,主要由中央和地方政府投资,农民少量投资和投劳。然后各级水利机构帮助农民设计施工,教会农民运行管理。这是符合“三个代表”重要思想的。

发达国家如美国,政府对农民农业给大量补贴,各级水利机构在科技上给农民帮助,出口农产品还给大量补贴。欧洲国家也是如此。

还有张东升等同志的文章《小浪底工程帷幕灌浆施工特点》,用 GIN 灌浆方法, $GIN = PV$ 。其中 P 灌浆压力没有考虑到坝前水深,GIN 的参数很难选择,难于考虑坝基的地质构造。小浪底左岸岩基帷幕灌浆后,漏水仍很严重。一般帷幕顶部灌浆压力为坝前水深压力的 2 倍,在断层和宽裂隙处,要加密灌浆孔或多层灌浆孔。小浪底工程左岸山体有许多隧洞和地下厂房,帷幕防渗和排水是十分重要的。

以上看法是否有当,请指正。

此致

敬礼!

张光斗上

2003 年 7 月 15 日