

DOI: 10.11779/CJGE202105021

不同膜厚复合土工膜的蠕变特性及模型研究

杨 武^{1,2}, 侍克斌^{*1,2}, 何建新^{1,2}, 刘 亮^{1,2}, 杨海华^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 复合土工膜被广泛应用于土石坝中, 其长期变形性能对结构安全及稳定性至关重要。通过长达 90 d 的蠕变试验, 对比分析了复合土工膜在不同厚度下的蠕变规律, 对典型的经验蠕变模型进行了归纳分类, 综合蠕变试验结果, 提出了基于厚度水平的经验蠕变模型, 验证了其适用性与可靠性; 通过理论分析, 提出了三参数黏弹性本构模型, 应用 Marquardt 优化迭代算法及全局最优化求解模型参数, 论证其合理性。结果表明: 荷载施加瞬时位移量迅速增加, 并随时间的增加应变增量逐渐减小, 最后趋于稳定; 当荷载为膜厚 0.4 mm 最大拉伸荷载的 60% 时, 膜厚每增加 0.1 mm, 长期稳定时应变降低约 6%; 提出基于厚度的经验蠕变模型可有效反映应变与时间的关系, 初始阶段的拟合效果更好; 黏弹性本构模型中, 厚度较薄时 kelvin 体对变形的影响更大, 厚度较厚时弹性系数 E_1 对变形的发展发挥着主要作用, 本构模型能够较准确的反映材料蠕变的最终应变量。经验蠕变模型与本构模型结合可较好的预测不同厚度水平下复合土工膜的整体变形。

关键词: 复合土工膜; 蠕变性能; 本构模型; 长期变形

中图分类号: TV41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)05-0955-07

作者简介: 杨 武(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事寒冷干旱区水利水电与水工结构方向的研究工作。E-mail: 137599344@qq.com。

Creep characteristics and model study of composite geomembrane with different film thicknesses

YANG Wu^{1,2}, SHI Ke-bin^{1,2}, HE Jian-xin^{1,2}, LIU Liang^{1,2}, YANG Hai-hua^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: Through 90 days of creep tests, the creep laws of composite geomembrane at different thickness levels are compared and analyzed. The previous typical creep models are classified and compared with the creep test results. An empirical creep model based on thickness level is proposed to verify its applicability and reliability. Based on the analysis of materials and creep data, a three-parameter viscoelastic constitutive model is proposed, and its rationality is demonstrated by using the Marquardt optimization iterative algorithm and the global optimization to solve model parameters. The results show that the composite geomembrane exhibits strong lateral contraction under the long-term tensile action of the load. The instantaneous displacement of the load increases rapidly, and the strain increment decreases with the increase of time, and finally tends to be stable. The strain of different film thicknesses is little affected by time. When the load level is 60%, every 0.1 mm increase in film thickness from 0.4 mm to 0.9 mm reduces the strain by about 6% in long-term stability. The empirical creep model based on thickness can effectively reflect the relationship between creep strain and time of two films, and the initial stage has better fitting effect. The three-parameter viscoelastic constitutive model is suitable for the attenuation creep curve and can accurately reflect the final strain of the materials in the creep stage.

Key words: composite geomembrane; creep behavior; constitutive model; long-term deformation

0 引言

复合土工膜结合土工布和土工膜的特点, 已广泛应用于大坝或防洪一类的重要工程。作为水利工程中重要的防渗材料之一, 复合土工膜是典型的高分子聚合物, 具有明显的流变特性^[1-3]。由于复合土工膜在工

程中的使用处于长期受力状态, 蠕变有可能产生过大的变形或强度衰减, 从而导致结构失效^[4]。因此, 蠕变性能是其抗拉能力能否在工程应用中长期发挥作用

基金项目: 新疆水利科技专项资金项目 (T201801)

收稿日期: 2020-08-18

*通信作者 (E-mail: xndsg@sina.com)

的关键。

目前, 关于土工合成材料的蠕变试验研究主要分为两种^[5-11]: ①一种是材料在长期受荷载作用下的蠕变试验研究, 一般试验时长超过 1000 h, 此类型的试验所耗费时间长, 但能反映出材料最为真实变化情况, 将材料的变形性能充分体现; ②另一种是通过时-温等效原理进行蠕变试验研究, 认为在高温下短时间内的蠕变变形与长时间温度较低时发生的蠕变变形是相同的, 从而可以在较短时间内进行预测材料的长期变形性能。许多学者^[12-19]通过蠕变特性的试验研究, 提出了多种模型来描述蠕变规律, 包括目前应用最为广泛的经验蠕变模型, 以及黏弹性及黏弹塑性的元件模型、内时模型等, 并可通过相关蠕变试验数据推求模型参数。这类模型在对于如土工膜、土工布、土工格栅等单一材料的拟合效果是理想的。复合土工膜是两种材料结合而成, 并综合发挥作用。复合土工膜在工程的选用中对土工布要求较低, 而对膜的厚度选择范围较广, 并且膜的厚度直接影响着材料的各项力学性能。

为了考虑不同膜厚的复合土工膜长期蠕变性能对结构变形及长期稳定性的影响, 本文对不同厚度的复合土工膜长期蠕变性能进行了深入研究, 通过长达 90 d 的蠕变试验, 得出在不同厚度下的蠕变规律, 分别建立蠕变经验模型与本构模型并进行了验证。研究结果对分析复合土工膜的长期工作性能及结构安全稳定性有着重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

水利工程中复合土工膜选用两布一膜的规格常为基布 200~600 g/m², 膜厚 0.25~1.0 mm^[1, 3]。本次试验选用工程中最为常用的两布一膜进行试验研究^[2-3], 土工膜为 HDPE 高密度聚乙烯膜, 土工布均为短纤针刺非织造布, 密度为 200 g/m², 以《土工合成材料试验规程》SL/T235—2012^[20]中规定的试验方法采用土工合成材料万能试验机测试进行试验, 基本力学性能见表 1。

表 1 复合土工膜的基本力学性能

Table 1 Technical indices of composite geomembrane

膜厚/mm	拉伸强度/(kN·m ⁻¹)		伸长率/%		圆柱顶破强力/kN	撕裂强力/kN	
	纵向	横向	纵向	横向		纵向	横向
0.4	14.4	14.6	51	51	2.7	0.50	0.51
0.5	16.3	16.9	56	53	3.1	0.57	0.59
0.6	18.1	18.4	66	66	3.6	0.64	0.64
0.7	21.3	21.6	69	67	4.4	0.71	0.74
0.8	23.9	24.2	73	69	5.2	0.79	0.80
0.9	26.8	27.3	88	92	6.9	0.91	0.92

1.2 试验方法

由于复合土工膜纵横向力学性能有差异, 保证试样的结果的可靠性并结合工程中材料的实际运用状态, 试样采用纵向进行裁剪, 尺寸根据《土工合成材料试验规程》SL/T235—2012 中条带拉伸试验的宽条法进行, 尺寸为 200 mm×100 mm。根据对学者们大量的试验研究结果进行分析^[6, 10], 当蠕变荷载不超过 60% 时, 试样不会产生破坏, 因复合土工膜随膜厚度增加最大断裂强度随之增加, 为研究材料在不同厚度下的蠕变规律, 并保证试样不产生破坏的前提下, 将荷载定为复合土工膜膜厚为 0.4 mm 最大断裂强度的 60% 进行加载。

使用各自保持独立、互不干扰的 6 台仪器进行试验, 并将测试环境温度控制在 (20±2) °C, 相对湿度控制在 (40±10) %, 开展了室内无风无扰动情况下为期 90 d 的长期蠕变试验, 为保持荷载的稳定性, 荷载采用砝码进行加载, 土工膜膜厚不同施加的砝码总质量相同, 放置砝码时缓慢轻放, 消除落距对试样所带来的冲击。为避免人为读数产生的误差, 变形数据由大量程电子千分表连接电脑进行数据自动采集。

2 试验结果与分析

2.1 蠕变试验曲线

复合土工膜属高分子材料, 具有明显的蠕变特性。在恒定荷载的作用下, 开展了为期 90 d 的不同厚度下复合土工膜的蠕变特性试验研究, 得出在不同厚度下应变随时间的蠕变变化曲线。其中图 1 为试样在 1 h 时间段内材料的蠕变曲线, 图 2 为试验 90 d 材料的蠕变曲线。

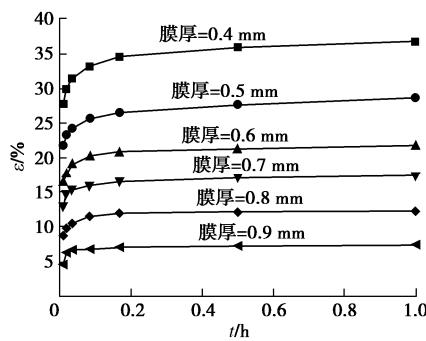


图 1 1 h 内的蠕变曲线

Fig. 1 Creep curves within 1 hour

由图 1, 2 可知, 不同厚度的复合土工膜处于同一拉伸荷载下, 蠕变变形符合大多数材料蠕变的一般规律, 呈现出高分子材料明显的两阶段变形特征。第 I 阶段, 试样在荷载施加的初始时刻变形量迅速增加, 短时间内应变随着时间的延长变化明显, 并且在此过程中复合土工膜表现出明显的横向收缩性特征, 而且

土工膜厚度越薄, 现象越显著, 反映出这一阶段主要以弹性变形为主; 当加载时间超过 30 min, 复合土工膜的蠕变变形进入了第 II 阶段, 位移随时间的增加逐渐趋于平缓, 增幅不断减小, 复合土工膜变形近似线性平稳地增长, 最终达到一个稳定的应变量。复合土工膜厚度由 0.9 mm 降至 0.4 mm, 蠕变应变分别稳定在 9%, 14%, 20%, 24%, 31% 及 40% 左右。厚度较薄的应变始终大于厚度较厚的应变, 并且随厚度的降低, 蠕变应变增长加快, 曲线的发展也比较陡峭, 试件的初始应变、应变增量增大, 蠕变达到稳态阶段的时间更长。

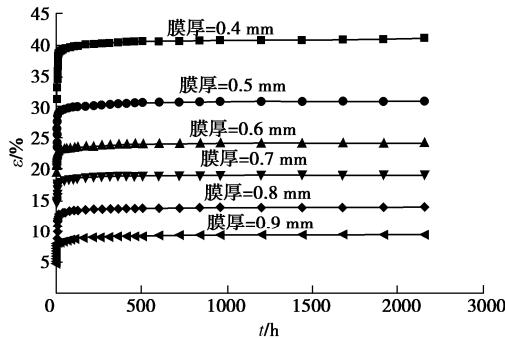


Fig. 2 Creep curves within 90 days

2.2 膜厚 - 应变的变化关系

为准确分析时间因素对复合土工膜不同厚度的影响, 建立不同时间下膜厚 - 应变的关系如图 3 所示。

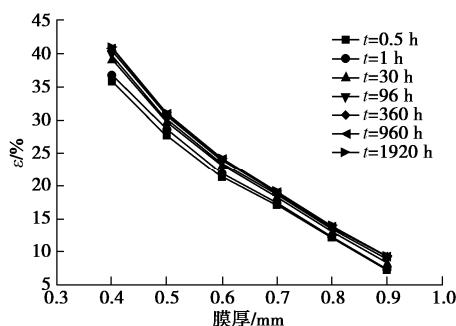


图 3 等时膜厚 - 应变的变化关系

Fig. 3 Relationship between isochronous film thickness and strain

从图中可以看出, 复合土工膜的应变随膜厚的增加而减小, 膜厚和应变呈反比关系, 并且在各等时条件下, 膜厚 - 应变曲线几乎处于同一位置。30 min 后, 在不同的应变下, 应力 - 时间的变化规律是相同的, 随着时间的增长, 应变变化不大, 说明膜厚 - 应变的关系受时间影响很小。同时, 可反映出随着土工膜膜厚的增加最终稳定时的应变量逐渐减小, 在长期稳定荷载作用下膜厚每增加 0.1 mm, 最终应变降低约 6%。

3 拉伸蠕变经验模型分析

3.1 经验蠕变模型的建立

经验蠕变模型有其独有的优势, 往往具有试验参数就可达到较为理想的拟合效果且实用性较强, 在工程的实践中具有较大的应用价值。结合国内外研究可知, 当前用于预测土工合成材料蠕变行为的经验模型可以大致分为以下 4 种: 幂函数与近幂函数, 对数和近对数函数, 双曲线函数以及其它经验型函数^[0-0], 见表 2 所示。

表 2 典型的经验蠕变模型

Table 2 Typical empirical creep models

类型	表达形式	备注
幂函数型	$\varepsilon = a + bt^n$	a, b, n 为材料的相关系数
对数函数型	$\varepsilon = \varepsilon_0 + m \lg t$	m 为蠕变曲线斜率, ε_0 为初始应变
双曲线函数型	$\varepsilon = \varepsilon_i + \frac{t}{a + bt}$	ε_i 为加载瞬时蠕变, a, b 为材料参数
蠕变速率型	$\dot{\varepsilon} = c_1 \varepsilon^{c_2 \bar{T}} \left(\frac{t_1}{t} \right)^m$	c_1, c_2, m 为材料相关参数, \bar{T} 为应力水平。
其它经验型	$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \frac{A}{1-m} e^{aL} (t^{1-m} - 1)$	L 为应力水平, a, A, m 为常数

根据复合土工膜蠕变试验结果, 不同厚度下应变的增量均以减速形式进行, 为衰减型蠕变曲线。按照表 2 中的不同的拟合模型对蠕变试验数据进行拟合, 分析各拟合曲线的拟合效果, 结果显示出对数函数型经验蠕变模型对蠕变试验数据的拟合效果最好, 其余函数的相关系数较低, 拟合效果不佳。因此对数函数型模型能够较好的模拟复合土工膜在不同厚度下应力应变关系曲线, 在一定程度上可以用来分析复合土工膜的长期变形。在表达式建立时, 发现复合土工膜的拉伸蠕变变形 S 不仅是时间 t 的函数, 而且还是复合土工膜膜厚度水平 D_i (为对应的各级厚度与初始厚度的比值) 的函数, 考察图 3 的数值变化规律发现, 采用二次函数已有较好的拟合效果并且运算相对简单, 因此蠕变的初始应变与厚度之间的关系 $\varepsilon(D_i)$ 可采用多项式函数关系; $S(t)$ 可采用对数函数型可较好的描述拉伸蠕变经验模型。那么, 复合土工膜经验蠕变模型的表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} g(t) &= \varepsilon(t_0) + m \lg t, \\ \varepsilon(D_i) &= a_1 D_i^2 + b_1 D_i + c_1, \\ m(D_i) &= a_2 D_i^2 + b_2 D_i + c_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon(t_0)$ 为应变初始时的蠕变结果, m 为蠕变曲线的斜率, a, b, c 为复合土工膜材料相关参数。将其代入到式 (1), 可得到经验蠕变模型的表达式:

$$S = a_1 D_i^2 + b_1 D_i + c_1 + (a_2 D_i^2 + b_2 D_i + c_2) \lg t. \quad (2)$$

在此关系式中, 仅需确定各系数的值, 就可得出复合土工膜基于厚度的经验蠕变模型的表达式, 从而

可计算出不同厚度下的蠕变变形。

3.2 经验蠕变模型的求解与评价

根据复合土工膜不同厚度的蠕变试验数据, 对建立的经验蠕变模型进行回归求解。对试验得出的蠕变曲线采用对数函数进行拟合, 拟合曲线见图 4 所示, 并根据各厚度下的对数回归的拟合方程, 得出经验蠕变模型的过程参数, 见表 3。

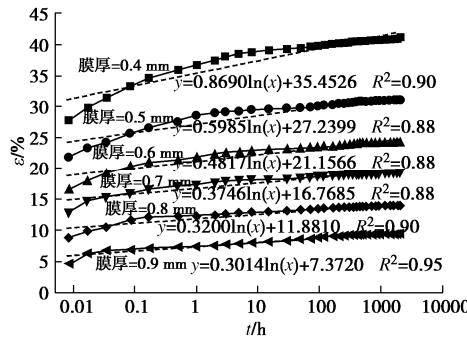


图 4 蠕变曲线采用对数函数拟合

Fig. 4 Creep curves fitted by logarithmic function

表 3 蠕变模型的过程参数

Table 3 Progress data of creep models

厚度 D	厚度水平 D_i	ε_0	m
0.4	1.00	35.4526	0.8690
0.5	1.25	27.2399	0.5985
0.6	1.50	21.1566	0.4817
0.7	1.75	16.7658	0.3746
0.8	2.00	11.8810	0.3200
0.9	2.25	7.3720	0.3014

根据表 3 中蠕变过程参数的取值, 代入到式(1), 可得出材料 a , b , c 的各相关参数值, 可得出各参数值。经验蠕变模型为

$$S = 6.66D_i^2 - 43.46D_i + 71.8 + (0.43D_i^2 - 1.83D_i + 2.25)\lg t. \quad (3)$$

可推求出在任意的厚度水平下的蠕变变形量。但这仅能表现为衰减蠕变的趋势, 并不能反映出加速蠕变的趋势。根据经验蠕变模型公式, 可得出对数函数模型值与实测值的对比, 见图 5。

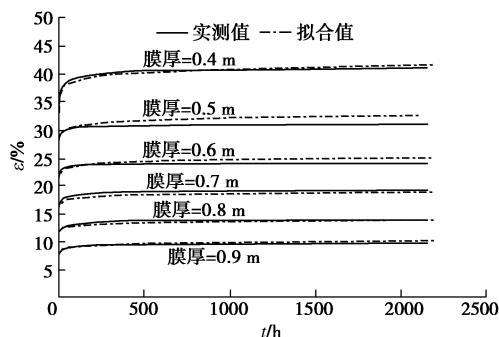


图 5 对数函数模型值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between model values of logarithmic function and measured values

由对数函数模型值与实测值的曲线对比可知, 模型值能够较好地反映复合土工膜在不同厚度水平下的蠕变曲线, 证明蠕变曲线中应变-厚度的关系采用多项式的关系是合适的, 应变-时间的关系曲线采用对数函数较为准确。在本文的模型中, 应变-时间的关系采用改进的对数函数, 在函数中增加厚度与应变之间的关系, 并确定基于厚度下对数函数的各参数值, 由此结合得到的蠕变模型曲线, 应变随时间的增长呈现出增幅降低, 并逐步趋于稳定。从图 5 中可以看出模型值与试验初始阶段曲线的蠕变特征非常吻合, 厚度为 0.5, 0.6 mm 在最终稳定时的对数函数拟合值与蠕变实测值产生部分偏差, 但整体表现出符合实测值的应变规律。因此, 经验蠕变模型能够较好的反映复合土工膜长期受荷载作用下发生的蠕变, 尤其是初始阶段拟合效果更好。

4 黏弹性本构模型分析

4.1 本构模型的建立

要建立复合土工膜蠕变简单的本构模型, 就需要对材料的变形特征作进一步的分析。首先, 从时间-应变规律角度进行分析, 试样在受荷载初始阶段变形迅速增加, 而后逐渐减小并趋于稳定。其次, 对复合土工膜材料在长期蠕变试验前后的样品状态进行分析, 将复合土工膜试样从试验仪上取下后, 材料的应变即可恢复一部分, 并随着时间的增加, 应变的恢复值越大, 恢复的增幅逐渐变小, 但材料仍然存在部分的永久变形, 不会恢复至加载前的初始状态。这表明, 复合土工膜材料符合黏弹性材料与黏塑性材料的加载及卸荷规律, 如图 6 所示。因此, 可以将复合土工膜认为是一种黏弹塑性材料。

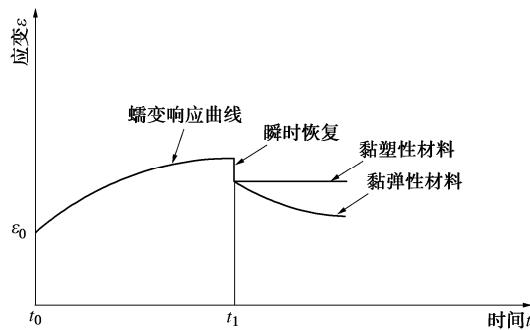


图 6 材料的蠕变卸荷曲线

Fig. 6 Creep and unloading curves of materials

在对材料进行蠕变试验时, 是在不同的厚度水平下进行的。通过得到的蠕变时间-应变的关系曲线(图 1, 2)以及膜厚-应变的关系曲线(图 3), 可以发现, 材料的应变量随时间的变化而变化, 也就是说在不同的厚度水平下计算出的应变-时间的关系曲线是不一

样的, 而形状是相同的, 因此可认为是可分离非线性蠕变曲线模型。而复合土工膜是一种高分子聚合物材料, 其本身是由两种不同的材料所组成, 所以应变也是由两种材料共同决定, 在其长期蠕变下的变形则反映出了部分弹性、塑性以及黏性, 为了能够更好地诠释这种变形, 通过黏弹性力学理论的方法, 采用将 kelvin 体 (弹簧、黏壶元件并联) 混合串联弹簧的方法来描述复合土工膜的蠕变力学行为, 构建了三参数黏弹性模型, 如图 7 所示。

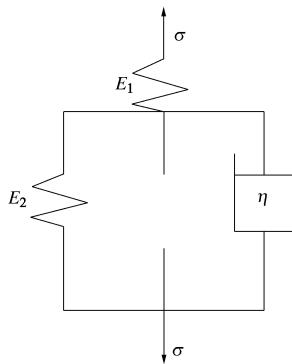


图 7 复合土工膜三参数黏弹性模型

Fig. 7 Three-parameter viscoelastic model for composite geomembrane

根据胡克定律可知弹簧的本构方程为

$$\sigma = \varepsilon_1 \cdot E_1 \quad (4)$$

而弹簧与 kelvin 体的受力是相同, 因此 kelvin 体的本构方程为

$$\sigma = \varepsilon_2 E_2 + \varepsilon_2 \eta \quad (5)$$

而复合土工膜的总变形为

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (6)$$

对式 (4) ~ (6) 经 Laplace 变换、推导, 最终得到应变变为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta}\right) + \frac{\sigma}{E_1 E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta}\right)\right] \quad (7)$$

式 (7) 中可得出, 当 $t \rightarrow 0$ 时, 也就是初始时刻,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \quad (8)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 近似于试验结束时,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1 + E_2} \quad (9)$$

可明显看出, 当荷载施加的初始时刻 kelvin 体还来不及发生变形, 但弹簧即可产生形变, 随着时间的增加, 应力保持不变, kelvin 体随时间的变化同样产生变形, 最终会趋近于一个稳定值, 这与试验得出的蠕变曲线有着相同规律。因此, 三参数模型从理论上讲可以模拟复合土工膜的蠕变行为。

4.2 本构模型的求解与评价

对于本构模型参数的求解就是确定弹性系数 E_1 , E_2 及黏滞系数 η , 通过各厚度水平下的蠕变试验数据, 进行 Levenberg-Marquardt 优化迭代算法及全局最优化求解理论, 优化拟合求解得出各厚度水平下的参数回归值, 见表 4。

表 4 复合土工膜三参数黏弹性模型参数值

Table 4 Values of parameters of three-parameter viscoelastic model for composite geomembrane

厚度 D	E_1/MPa	E_2/MPa	$\eta /(\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$
0.4	3.103	0.204	24.271
0.5	3.952	0.170	19.346
0.6	5.230	0.127	14.668
0.7	6.724	0.098	11.387
0.8	9.852	0.063	7.344
0.9	18.701	0.026	3.229

通过三参数本构模型参数值可以进一步推导出弹性系数 E_1 , E_2 及黏滞系数 η 与厚度之间的关系, 表现出随着厚度的增加, 弹性系数 E_1 逐渐增加、 E_2 不断减小, 黏滞系数 η 不断减小。这说明当土工膜厚度较薄时, 如膜厚为 0.4 mm 时, kelvin 体发挥着更大的作用, 也就是说厚度较薄时土工布的变形影响表现的相对更加明显。土工膜厚度较厚时, 如 0.9 mm 的膜厚, 弹性系数 E_1 值更大, 说明土工膜对变形的影响更加显著。根据表 4 中本构模型中弹性系数 E_1 , E_2 及黏滞系数 η 的结果, 代入到式 (7) 中, 可得出复合土工膜黏弹性本构模型的计算拟合值, 与实测值的对比如图 8 所示。

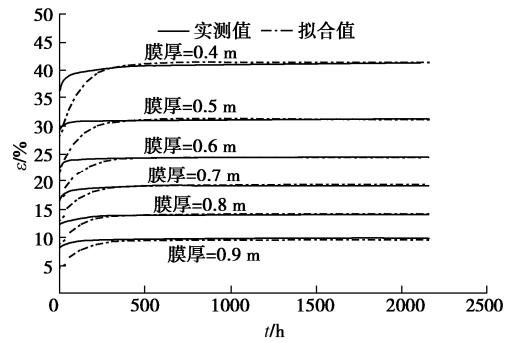


图 8 复合土工膜本构模型值与实测值对比

Fig. 8 Comparison between values of constitutive model and measured values

从图 8 中可以看出, 三参数黏弹性本构模型在复合土工膜不同厚度下, 不能很好的反映施加荷载初期材料的应变, 但能够相当准确的模拟复合土工膜蠕变的最终蠕变量, 是一个能够充分考虑时间和厚度的共同效应的合理模型。

5 结 论

本文选用不同厚度的复合土工膜, 进行了同一荷

载下长达 90 d 的室内蠕变试验研究，并通过经验蠕变模型与本构模型的理论分析，主要得出 4 点结论。

(1) 在横定荷载的作用下，复合土工膜蠕变特性与厚度有关，当厚度越薄，蠕变应变越大，复合土工膜表现出的横向收缩性越明显。

(2) 对于不同厚度的复合土工膜蠕变试验，可反映出随膜厚的增加最终稳定时的应变减小，膜厚为 0.4 mm 时蠕变应变最大，90 d 的应变稳定在 40% 左右，在长期稳定荷载作用下膜厚每增加 0.1 mm，应变量降低约 6%。

(3) 在几类典型的经验蠕变模型中，对数函数模拟复合土工膜精度最高，同时，契合精度并不会随着厚度的增加而降低。建立基于膜厚的经验蠕变模型能够较为精确的反映蠕变实际情况，尤其对于试验初期的拟合效果更好。根据蠕变试验数据及试样试验前后的行为表现提出了黏弹性本构模型，与实测结果对比说明，荷载施加初期虽不能较好拟合实测值，但能够准确可靠的描述长期荷载下的最终变形值。

(4) 结合复合土工膜经验蠕变模型以及黏弹性本构模型，依据二者计算参数值和拟合效果，经验模型更好的模拟初始时刻的应变，本构模型可较精确的表示最终应变量。采用最简单的经验蠕变模型及三参数模型，综合进行分析，可推求出复合土工膜在不同厚度下衰减阶段各时间点的位移量，并准确预测最终变形值。可为工程设计及安全稳定性评价提供必要的理论基础。

参考文献：

- [1] 顾淦臣. 土工膜用于水库防渗工程的经验[J]. 水利水电科技进步, 2009, 29(6): 34 - 38, 48. (GU Gan-cheng. Experience of applying geomembrane in reservoir seepage control[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 34 - 38, 48. (in Chinese))
- [2] 岑威钧, 温朗昇, 和浩楠. 水库工程防渗土工膜的强度、渗漏与稳定若干关键问题[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(6): 1183 - 1192. (CEN Wei-jun, WEN Lang-sheng, HE Hao-nan. Strength, leakage and stability problems of impermeable geomembrane for reservoir project[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(6): 1183 - 1192. (in Chinese))
- [3] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢. 中国水库大坝土工膜防渗技术进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 1): 1 - 9. (SHU Yi-ming, WU Hai-min, JIANG Xiao-zhen. The development of anti-seepage technology with geomembrane on reservoirs and dams in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 1 - 9. (in Chinese))
- [4] BLACK P J, HOLTZ R D. Performance of geotextile separators five years after installation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(5): 404 - 412.
- [5] PETROV R J, ROWE R K. Geosynthetic clay liner (GCL)-chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 863 - 885.
- [6] 李倩. 土工膜蠕变机理及其长期预测研究[D]. 济南: 山东大学, 2009. (LI Qian. Research on Mechanism and Long-Term Prediction of Geomembrances Creep[D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese))
- [7] 李艳琴. 复合土工膜蠕变性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006. (LI Yan-qin. Study on Creep Properties of Composite Geomembrances[D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese))
- [8] 王钊. 土工合成材料的蠕变试验[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 96 - 102. (WANG Zhao. Creep test for geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(6): 96 - 102. (in Chinese))
- [9] 王钊, 李丽华, 王协群. 土工合成材料的蠕变特性和试验方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 723 - 727. (WANG Zhao, LI Li-hua, WANG Xie-qun. Creep properties and testing methods of geosynthetics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 723 - 727. (in Chinese))
- [10] 王广月, 李华銮, 李艳琴. 复合土工膜蠕变性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1599 - 1603. (WANG Guang-yue, LI Hua-luan, LI Yan-qin. Experimental research on creep properties of composite geomembrane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1599 - 1603. (in Chinese))
- [11] JEON Y H, KIM S H, YOO H K. Assessment of long-term performances of polyester geogrids by accelerated creep test[J]. Polymer Testing, 2002, 21(5): 489 - 495.
- [12] MAHDAVI R, GOODARZI V, ALI KHONAKDAR H, et al. Experimental analysis and prediction of viscoelastic creep properties of PP/EVA/LDH nanocomposites using master curves based on time-temperature superposition[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(38): 46725 - 46736.
- [13] YANG T C, CHIEN Y C, WU T L, et al. Effects of heat-treated wood particles on the physico-mechanical properties and extended creep behavior of wood/recycled-hdpe composites using the Time-temperature superposition principle[J]. Materials, 2017, 10(4): 365 - 377.

- [14] DIAS M H, JANSEN K M B, LUINGE J W, et al. Effect of fiber-matrix adhesion on the creep behavior of CF/PPS composites: temperature and physical aging characterization[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2016, **20**(2): 245 - 262.
- [15] MARTIN P, ROBERT K, LLJA K, et al. Determination of the long-term properties in laminate-thickness direction of textile-reinforced thermoplastic composites under compression using time-temperature superposition[J]. Advanced Engineering Materials, 2016, **18**(3): 369 - 375.
- [16] WINESETT D A, ZHU S, SOKOLOV J, et al. Time-temperature superposition of phase separating polymer blend films[J]. High Performance Polymers, 2000, **12**(4): 599 - 602.
- [17] 刘华北. 土工合成材料循环受载、蠕变和应力松弛特性的统一本构模拟[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7): 823 - 828. (LIU Hua-bei. Unified constitutive modeling of the cyclic, creep and stress relaxation behavior of geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(7): 823 - 828. (in Chinese))
- [18] MURPHY G P. The influence of geoform creep on performance of a compressible inclusion[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997, **15**(1): 121 - 130.
- [19] 李丽华, 王 钊, 陈 轮. 加速土工合成材料蠕变试验的荷载叠加法[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(3): 410 - 413. (LI Li-hua, WANG Zhao, CHEN Lun. Load superposition for accelerating creep test of geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 410 - 413. (in Chinese))
- [20] 姜海波. 土石坝坝体、坝基和水库库区土工膜防渗体力学特性及渗透系数研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2011. (JIANG Hai-bo. Study on Mechanical Properties and Permeability Coefficient of Impervious Body with Geomembrane for Earth Rockfill Dam and Reservoir Area[D]. Wulumuqi: Xinjiang Agricultural University, 2011. (in Chinese))
- [21] 土工合成材料测试规程: SL235—2012[S]. 2012. (Test Procedure for Geosynthetics: SL235—2012[S]. 2012. (in Chinese))
- [22] 周志刚, 李雨舟. 土工格栅蠕变特性及其黏弹塑性损伤本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1943 - 1949. (ZHOU Zhi-gang, LI Yu-zhou. Creep properties and viscoelastic-plastic-damaged constitutive model of geogrid[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1943 - 1949. (in Chinese))
- [23] 包承纲, 童 军, 丁金华. 土工合成材料流变参数合理选择的研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(3): 410 - 418. (BAO Cheng-gang, TONG Jun, DING Jin-hua. Reasonable selection of rheological parameters of geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(3): 410 - 418. (in Chinese))
- [24] SIRIWARDANE H, GONDLE R, KUTUK B. Analysis of flexible pavements reinforced with geogrids[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2010, **28**(3): 287 - 297.