

DOI: 10.11779/CJGE202211021

土工膜蠕变与蠕变恢复特性试验及数学模型研究

岑威钧, 文震宇, 李邓军, 王力波

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 开展了3种不同厚度的HDPE土工膜6种荷载水平下的蠕变与蠕变恢复试验, 对土工膜蠕变与蠕变恢复特性及其影响因素进行深入分析。研究表明: 荷载施加与卸除的瞬间, 土工膜产生瞬时变形, 之后变形速率随时间逐渐变小。当荷载水平较低(如小于30%)时, 土工膜蠕变随时间持续增加并较快地趋于稳定状态; 当荷载水平较高(如大于40%~50%)时, 土工膜将进入第二阶段蠕变, 变形以恒定速率持续增长, 不再稳定。当荷载水平超过20%时, 完全卸载后土工膜蠕变恢复时产生残余变形, 且残余变形随荷载水平增大近似呈线性增加。土工膜初始模量受荷载水平与蠕变过程的双重影响, 当荷载水平上升至40%~50%时, 其初始模量将显著下降超100 MPa, 其中在加载初期初始模量下降约40%, 经过蠕变后卸载初始模量进一步下降约30%。此外, 改进建立了考虑材料黏弹性的土工膜蠕变联合元件模型及蠕变恢复模型, 与试验数据对比验证了所建模型能较好地反映不同荷载水平下土工膜的蠕变及蠕变恢复过程。

关键词: HDPE 土工膜; 蠕变; 蠕变恢复; 荷载水平; 联合元件模型

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)11-2143-08

作者简介: 岑威钧(1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土工膜防渗与土石坝抗震方面的研究工作。E-mail: hhucwj@163.com。

Experimental study and numerical modelling on creep and creep recovery characteristics of geomembrane

CEN Wei-jun, WEN Zhen-yu, LI Deng-jun, WANG Li-bo

(College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The creep and creep recovery of HDPE geomembrane with three different thicknesses under six different load levels are investigated. The creep and creep recovery characteristics of the geomembrane and their influencing factors are deeply analyzed. The test results show that the geomembrane deforms instantly when the load is applied and removed, and then the deformation rate gradually slows down with time. When the load level is lower than 30%, the deformation of the geomembrane tends to be stable with time. When the load level is higher than 40%~50%, the strain of the geomembrane increases at a constant rate in the second stage creep. When the applied load level exceeds 20%, the geomembrane will produce residual deformation after creep recovery and complete unloading, and the residual deformation will increase approximately linearly with the increase of load level. The initial modulus of the geomembrane is influenced by both the load level and the creep process. When the load level of the geomembrane rises to 40%~50%, its initial modulus will drop significantly by more than 100 MPa. In addition, a composite element model for the creep and creep recovery of geomembrane considering the viscoelastic properties of materials is established. The numerical simulation shows that the proposed model can well reflect the creep and creep recovery process of the geomembrane under different load levels.

Key words: HDPE geomembrane; creep; creep recovery; load level; composite element model

0 引言

土工膜由于具有防渗性优越、适应变形能力强、施工便捷和造价低廉等优点, 已广泛应用于堤坝、库盆、水池、垃圾填埋场等水利工程和环境岩土工程^[1-2]。土工膜在实际工程(比如水库防渗)中作为防渗体应用时, 受到覆盖层自重、水压力、界面摩擦力、结构变形引起的拉力等荷载作用, 蓄水后除瞬时变形外还

会产生蠕变变形。当水位消落时, 土工膜所受荷载随之减小, 开始出现蠕变恢复现象。

目前, 国内外学者开展了不少包括土工膜在内的高分子聚合物蠕变特性试验研究。Nishigata等^[3]对膜下

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979089, 51679073); 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室开放基金项目(PKLHD202004)

收稿日期: 2021-11-19

垫层出现不均匀沉降引起的土工膜蠕变进行了研究,发现当蠕变应变超过 12%时,会较快导致土工膜蠕变破坏,并认为经过蠕变作用的土工膜抗拉强度较初始值降低 40%。Koerner 等^[4]根据复合土工膜蠕变试验,发现断裂即将发生之前土工膜可以保持相当大的变形,并认为在工程设计中土工膜拉伸强度应有 1.5 倍折减。王广月等^[5]开展了 4 级荷载下复合土工膜蠕变试验,发现长期拉伸作用下复合土工膜表现出横向收缩特性,且颈缩量的大小与荷载成正比;当所受荷载低于 60%极限荷载时,材料强度仍然保持在 70%左右,可视可靠且不影响工程稳定性。杨武等^[6]研究了不同厚度复合土工膜蠕变特性,发现蠕变稳定时的应变随膜厚增加呈线性减小,相同恒载下膜厚每增加 0.1 mm,稳定应变量较小约 6%。此外,亦有学者开展了土工格栅方面的蠕变研究,可供参考借鉴。

相较于高分子聚合物材料加载蠕变研究,对其开展蠕变恢复特性的研究相对较少。Leaderman 等^[7]以 20 min 为一周期,对聚氯乙烯试样进行了蠕变与蠕变恢复循环试验,发现聚氯乙烯蠕变与蠕变恢复符合玻尔兹曼叠加原理。Hao 等^[8]对聚丙烯复合材料进行了 72 h 蠕变和 24 h 蠕变恢复试验研究,通过试验发现聚丙烯复合材料在高温下有较高的蠕变恢复率,温度上升后聚合物蠕变抗力减弱。敬凌霄^[9]对聚酯织物增强膜进行 7 h 蠕变和 7 h 蠕变恢复试验,发现聚酯织物膜蠕变与蠕变恢复大小与应力水平呈线性关系,与时间呈指数关系。汪泽幸等^[10]对蠕变后的 PVC 涂层膜进行应力卸载试验,发现蠕变恢复受卸载应力大小与加、卸载速率影响,但加、卸载速率仅影响蠕变恢复量。

总体而言,目前对于土工膜蠕变特性的研究主要集中于加载蠕变阶段,对荷载降低时的蠕变恢复研究很少,而实际工程中土工膜所受荷载常处于加载或卸载状态,使土工膜呈现蠕变变形或蠕变恢复特性。基于此,本文开展了土工膜加载蠕变及卸载后的蠕变恢复试验,获得不同荷载水平下土工膜的蠕变和蠕变恢复规律,对土工膜的蠕变和蠕变恢复初始模量变化进行比较分析,改进建立了考虑黏弹性特性的蠕变数学模型,并对土工膜蠕变变形及蠕变恢复试验数据进行模拟验证,相关成果可为工程设计提供理论指导。

1 试验材料与方案

试验选用厚度分别为 0.5, 1.0, 1.5 mm 的高密度聚乙烯(HDPE)土工膜。根据《土工合成材料试验规程》(SL/T235—2012),对密度为 0.94 g/cm³的 3 种厚度试验土工膜进行单向拉伸试验,测得土工膜基本力学指标,见表 1。土工膜加、卸载蠕变试验参照国

家规范 GB/T1040—2018 采用窄条法,试样尺寸为 160 mm×50 mm,其中试样蠕变变形测量范围为 100 mm×50 mm,两端预留 30 mm 夹持长度用以固定土工膜。

表 1 HDPE 土工膜拉伸力学特性
Table 1 Properties of geomembranes

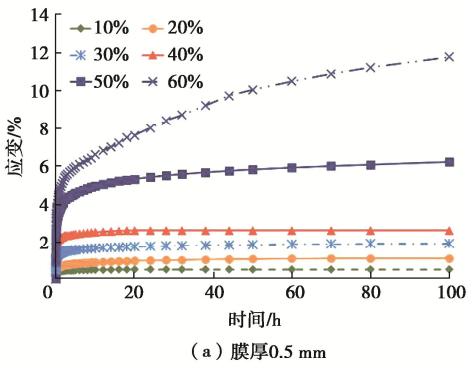
厚度 /mm	屈服强度 /(N·mm ⁻¹)	屈服应 变/%	断裂强度 /(N·mm ⁻¹)	断裂应变 /%
0.5	5.71	12.49	5.04	506.38
1.0	10.35	22.36	11.45	416.15
1.5	15.75	17.00	15.68	610.32

本试验采用 3 种不同厚度土工膜(0.5, 1.0, 1.5 mm)和 6 级荷载(10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%屈服强度),设置 3×6 组试验方案。荷载大小采用荷载水平进行量化,即所施加荷载大小占土工膜屈服强度的百分比。本次蠕变与蠕变恢复试验均在室温(23~25℃)条件下进行,在土工膜加载试验持续 100 h 时,卸除荷载,并记录土工膜回弹变形过程。

2 试验结果与分析

2.1 蠕变与蠕变恢复试样变形特性

图 1 为不同荷载水平下不同厚度 HDPE 土工膜试样蠕变曲线。由图可见,在蠕变试验过程中,土工膜在加载后产生瞬时变形,随后在蠕变第一阶段迅速增加,且蠕变速率逐渐趋缓。在 100 h 的试验时间内,所受荷载水平较低的试样蠕变速率趋于零,蠕变变形达到稳定值,而荷载水平较高时部分试样持续以相对恒定速率蠕变,蠕变变形持续增加,不再出现稳定值。以 1.0 mm 厚土工膜为例,在荷载水平 10%, 20%, 30% 时,土工膜蠕变较快地稳定于 0.42%, 1.03%, 2.21%, 稳定应变随荷载水平增大而升高。当荷载水平上升至 40%及以上时,在 100 h 试验时间内土工膜进入了恒速蠕变阶段(第二阶段蠕变)。其中, 40%, 50%, 60% 荷载水平下土工膜的蠕变速率分别为 0.006, 0.010, 0.014 mm/h,蠕变速率随荷载水平升高近似呈线性增加,在蠕变试验结束时蠕变应变分别为 4.35%, 7.41%, 8.87%。



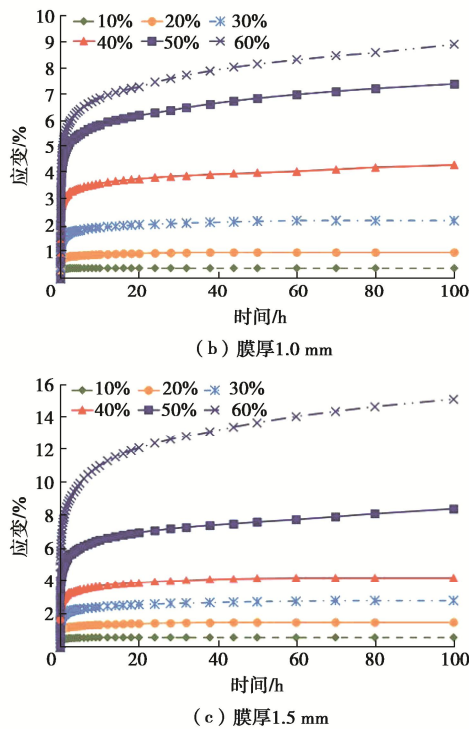
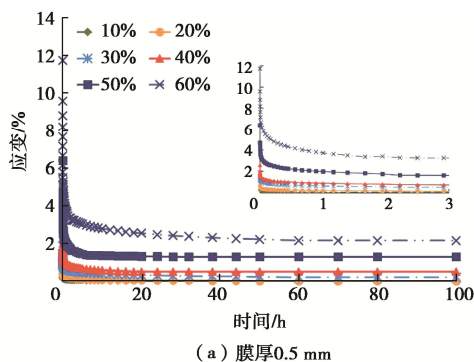


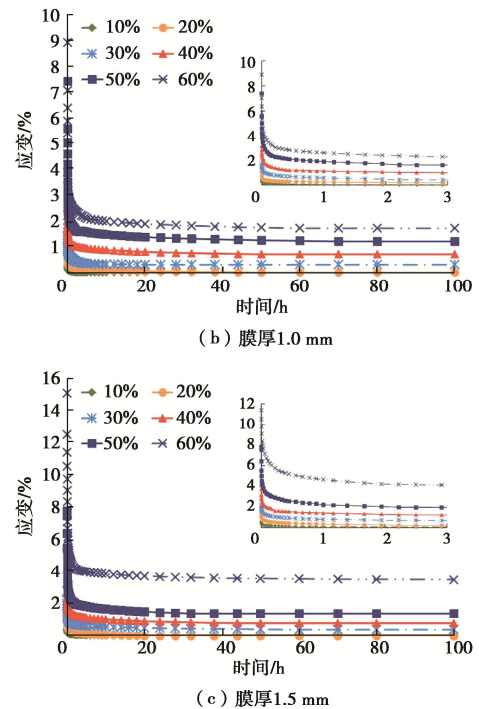
图 1 不同厚度 HDPE 土工膜蠕变曲线

Fig. 1 Curves of creep of HDPE geomembranes

图 2 为不同荷载水平下不同厚度 HDPE 土工膜试样蠕变恢复曲线。由图可知, 不同厚度土工膜蠕变恢复变化规律相似, 卸载后土工膜在初始阶段变形迅速减小, 随后曲线缓慢下降, 并趋于稳定。在 100 h 的卸载时间内, 只有 10%, 20% 荷载水平下的土工膜蠕变变形完全恢复, 即无残余变形; 其余荷载水平下, 土工膜均出现了残余变形, 且荷载水平越大, 土工膜残余变形量亦越大。以 1.0 mm 厚土工膜为例, 当所卸除的荷载水平低于 20% 时, 土工膜蠕变变形完全恢复至零; 但当荷载水平达到 30% 时, 完全卸载后的土工膜依旧有 0.28% 残余变形, 残余变形占总变形量比例为 12.67%; 当荷载水平分别为 40%, 50%, 60% 时, 土工膜残余应变分别为 0.68%, 1.26%, 1.65%, 占总应变比例分别为 15.63%, 17.01%, 18.60%。表明经历高荷载水平蠕变后的土工膜的黏弹性变形减小, 而不可恢复的残余变形比例增大。



(a) 膜厚 0.5 mm



(c) 膜厚 1.5 mm

图 2 不同厚度 HDPE 土工膜蠕变恢复曲线

Fig. 2 Curves of creep recovery of HDPE geomembranes

2.2 蠕变与蠕变恢复曲线对照分析

将不同荷载水平下土工膜蠕变恢复曲线“上下翻转”, 并与土工膜蠕变曲线进行比较。以 1.0 mm 厚土工膜为例, 对蠕变与蠕变恢复曲线进行比较展示, 如图 3 所示。在 10%, 20% 荷载水平下, 蠕变曲线与蠕变恢复曲线近乎重合, 表明在低荷载水平下 HDPE 土工膜中晶区几乎不发生任何变化, 主要无定形区中分子链的键长、键角被拉伸所引起, 当撤除外力后分子链变形能够恢复^[11-12], 宏观上表现为卸载后土工膜蠕变变形的完全恢复。当荷载水平升至 30%, 40% 时, 在加载与卸载后 10 h 内土工膜蠕变曲线与恢复曲线重合, 随后恢复曲线进入应变无明显变化的稳定阶段, 土工膜蠕变恢复变形与蠕变变形的差值随时间增长而增大, 即土工膜出现了残余变形, 表明此时土工膜内无定形区分子链沿蠕变方向拉伸, 进而造成晶区开始发生缓慢滑移^[11,13], 宏观上表现为土工膜蠕变趋近于稳定应变, 但在卸载后存在少量不可恢复的残余变形。当荷载水平处于 50%, 60% 时, 土工膜的恢复曲线与蠕变曲线即使在初始阶段亦不再重合, 恢复曲线在初始阶段应变变化量明显大于蠕变曲线初始阶段应变, 并且恢复曲线快速达到应变稳定阶段。

为了进一步分析荷载水平对土工膜蠕变及蠕变恢复特性的影响, 选取若干典型时刻, 对应变-荷载关系进行分析。限于篇幅, 仅给出 1.5 mm 厚土工膜的结果, 见图 4。在土工膜蠕变与蠕变恢复试验中, 其变形均随荷载水平的增加逐渐增大, 在相对较低荷载水平下不同典型时刻的蠕变变形随荷载水平呈线性增大趋势, 但在较高荷载水平时, 应变有显著增大。其

中, 0.5, 1.5 mm 厚土工膜各时刻的应变 - 荷载关系曲线在 40% 荷载水平后增长明显, 1.0 mm 厚土工膜各时刻的应变 - 荷载关系曲线在 30% 荷载水平后增长明显。对比加、卸载时的应变 - 荷载曲线, 土工膜蠕变恢复过程各特定时刻曲线在高荷载水平下更为集中, 加载试验中前 0.5 h 时土工膜应变变量约占总应变量的 40% 左右, 而卸载试验中前 0.5 h 时土工膜应变变量达到总应变量的 60% 左右。

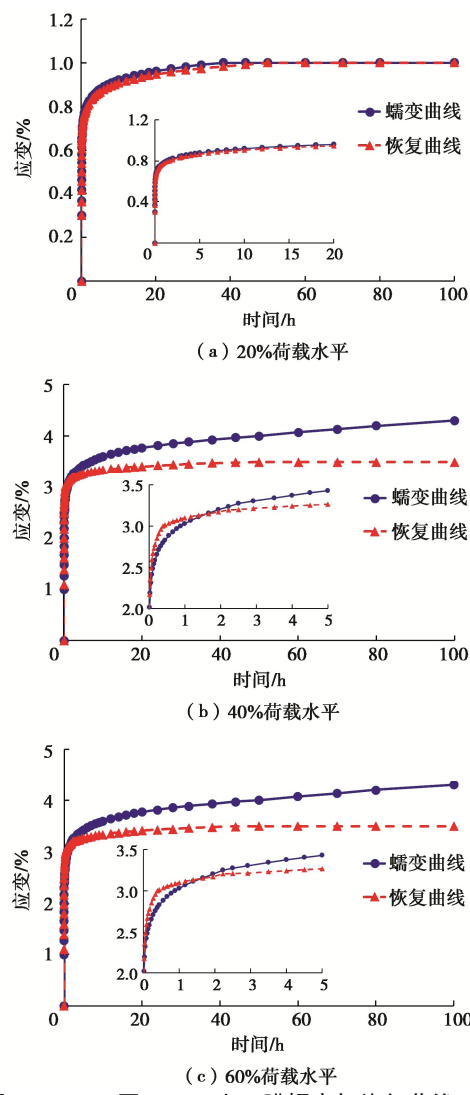


图 3 1.0 mm 厚 HDPE 土工膜蠕变与恢复曲线对比

Fig. 3 Comparison of creep and recovery curves of 1.0 mm-thick HDPE geomembrane

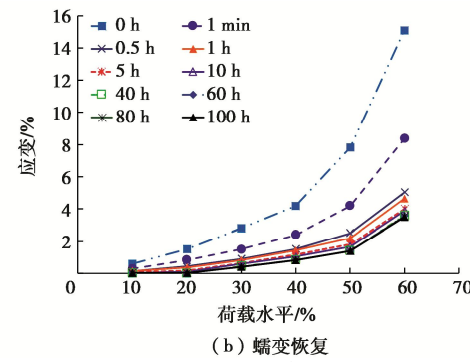
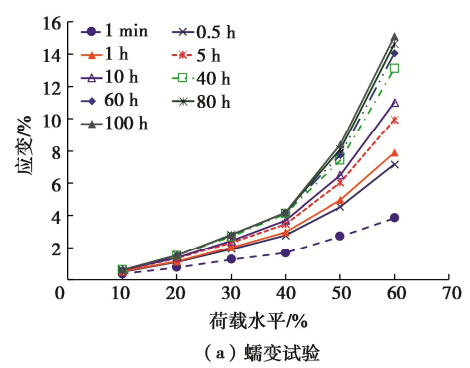


图 4 1.5 mm 厚 HDPE 土工膜等时应变 - 荷载曲线

Fig. 4 Isochronous stress-strain relation curves of 1.5 mm-thick HDPE geomembrane

2.3 蠕变与蠕变恢复初始模量特性

以土工膜初始模量为例, 进一步分析探究土工膜在蠕变与蠕变恢复过程中力学性质的变化规律。Cheng 等^[14]和 Liu 等^[15]为避免蠕变试验加载瞬时变形记录误差, 取蠕变 60 s 时应变计算不同荷载水平下土工膜蠕变初始模量。本文按此方法分别计算蠕变与蠕变恢复初始模量, 不同厚度土工膜初始模量随荷载水平变化规律如图 5 所示。

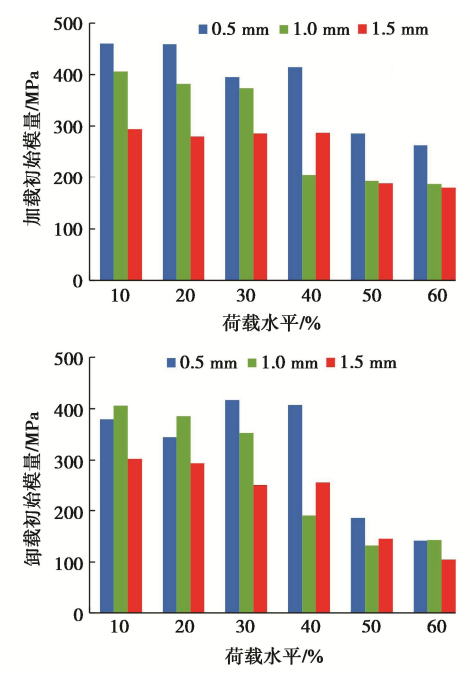


图 5 不同荷载水平下 HDPE 土工膜蠕变与蠕变恢复初始模量

Fig. 5 Creeps and initial modulus of HDPE geomembranes under different load levels

0.5~1.5 mm 厚土工膜初始模量变化趋势相似, 当荷载水平达到 40% (出现第二阶段恒定速率蠕变) 时, 1.0 mm 厚土工膜蠕变与恢复初始模量均迅速下降, 且恢复初始模量下降幅度大于蠕变初始模量下降幅度, 模量下降幅度均大于 100 MPa。0.5, 1.5 mm 厚土工膜在荷载水平达到 50% 时, 蠕变与恢复初始模量均迅速下降约 120 MPa。表明土工膜在出现第二阶段

表 2 土工膜蠕变与恢复初始模量
Table 2 Comparison of initial moduli under different load levels

膜厚/mm	较低荷载水平/MPa		较高荷载水平/MPa		E_s'/E_s	E_u'/E_u	E_u/E_s	E_u'/E_s
	E_s	E_s'	E_u	E_u'				
0.5	432.43	387.49	274.58	164.08	0.90	0.60	0.63	0.38
1.0	387.53	381.91	194.90	155.17	0.99	0.80	0.50	0.40
1.5	287.17	276.45	194.40	145.80	0.96	0.75	0.68	0.51
平均值	—	—	—	—	0.95	0.71	0.60	0.43

恒定速率蠕变时, 土工膜内材料晶区发生分子链的解缠与滑移^[10], 导致部分晶区在蠕变过程中转变为无定形区, 与部分学者对高分子聚合物晶区和无定形区初始模量进行的试验测定^[16-17]与分子动力学模拟^[11]所得到晶区初始模量比无定形区初始模量至少大 70 MPa 的结果相吻合。

表 2 给出了不同厚度土工膜蠕变与蠕变恢复初始模量平均值及其对比关系, 其中 E_s , E_s' 分别为蠕变第二阶段蠕变速率为 0 (较低荷载水平) 时的土工膜蠕变与蠕变恢复初始模量平均值, E_u 和 E_u' 分别为蠕变第二阶段为恒定蠕变速率 (较高荷载水平) 时的土工膜蠕变与蠕变恢复初始模量平均值。对比 E_u/E_s 可知, 当荷载水平较高时, 土工膜蠕变初始模量约为荷载水平较低时的 0.6 倍, 表明较高荷载水平使土工膜蠕变初始模量下降。对比 E_s'/E_s , E_u'/E_u 可知, 当荷载水平较低时土工膜蠕变与蠕变恢复初始模量变化不大, 而当经过较高荷载水平蠕变后, 土工膜蠕变恢复初始模量约为 0.71 倍的蠕变初始模量。对比 E_u'/E_s 可知, 较高荷载水平下蠕变恢复初始模量仅为 0.43 倍较低荷载水平下的相应值, 表明蠕变恢复初始模量同时受荷载水平与蠕变过程的双重影响, 其中荷载水平使蠕变初始模量有约 40% 下降 (E_u/E_s), 而经之前的蠕变过程进一步使土工膜蠕变恢复初始模量下降约 30% (E_u'/E_u)。

3 土工膜蠕变及蠕变恢复模型

3.1 模型的改进

恒定荷载下, 土工膜蠕变常用模型有三元件和四元件黏弹性模型^[18], 其表达式分别为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-tE_2/\eta_1}) \quad , \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-tE_2/\eta_1}) + \frac{\sigma_0}{\eta_2} t \quad , \quad (2)$$

式中, ε 为蠕变应变, σ_0 为恒定蠕变应力, E_1 , E_2 为弹性模量, η_1 , η_2 为黏性模量。

当处于初始时刻 (t 趋于 0) 时, 两式均有瞬时应

变 $\varepsilon = \sigma_0 / E_1$; 当时间足够长时, 式 (1) 中的应变趋于稳定, 应变速率为 0, 稳定应变为 $\varepsilon = \sigma_0 (E_1 + E_2) / E_1 E_2$, 式 (2) 则进入应变速率为 σ_0 / η_2 的蠕变阶段。这与试验得到的不同荷载水平下 HDPE 土工膜蠕变试验曲线有着相同规律, 即式 (1), (2) 可分别模拟较低荷载水平下的蠕变稳定过程和较高荷载水平下恒速蠕变过程。

为了更好反映土工膜在不同荷载水平下的蠕变过程, 将三元件与四元件模型组合得到改进的黏弹性联合元件模型, 如图 6 所示。其中黏壶元件由应力控制元件激活 (虚线框内), 当土工膜处于较低荷载水平时, 应力控制元件使黏壶元件不发挥效用。

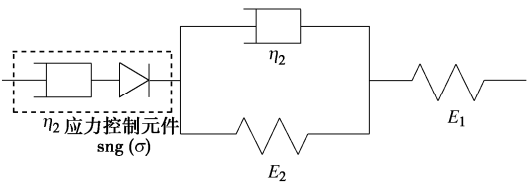


图 6 土工膜联合元件模型

Fig. 6 Composite element model for geomembrane

联合式 (1), (2) 推导可得不同荷载水平下土工膜黏弹性蠕变方程:

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-tE_2/\eta_1}) + \frac{(\text{sgn}(\sigma_0 - \sigma_s) + 1) \sigma_0}{2\eta_2} t \quad , \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases} \quad , \quad (4)$$

式中, ε_c 为蠕变应变, σ_0 为恒定蠕变应力, σ_s 为发生恒速蠕变时的蠕变应力, 其余变量解释同前。

经过“上下翻转”得到的土工膜蠕变恢复曲线与三元件模型有着相同的规律, 即在荷载变化瞬间产生瞬时应变, 随后应变速率随时间趋于零, 应变最终达到稳定值。当在 t_1 时刻撤除荷载时, 土工膜蠕变应变恢复过程为

$$\varepsilon_r = \varepsilon_c(t_1) - \left[\frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-(t-t_1)E_2/\eta_1'}) \right] \quad (t \geq t_1) \quad , \quad (5)$$

式中, ε_r 为蠕变恢复应变, σ_0 为卸载应力, E_1' , E_2' 为蠕变恢复弹性模量, η_1' 为蠕变恢复黏性模量。

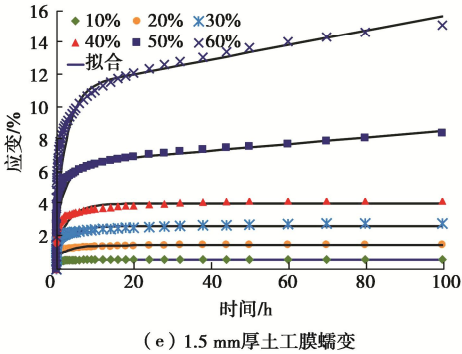
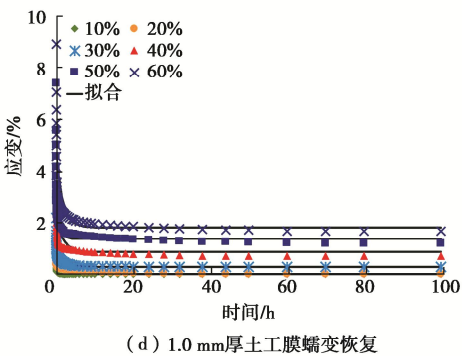
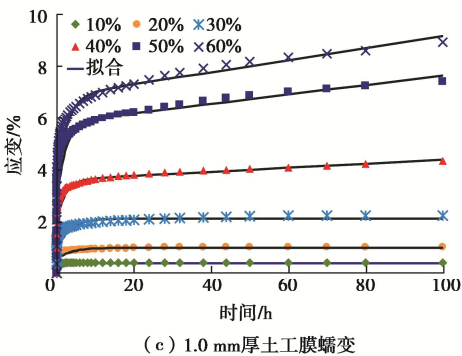
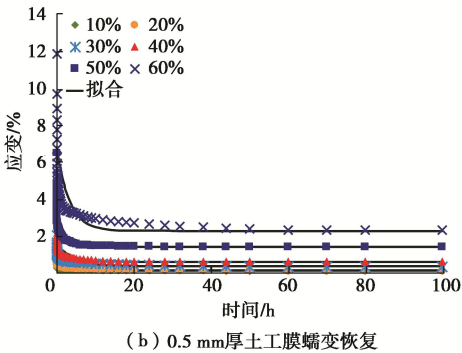
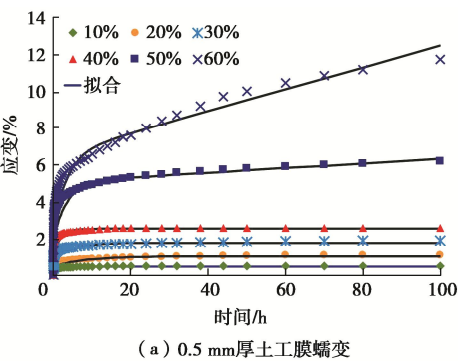
表 3 1.0 mmHDPE 土工膜蠕变及蠕变恢复模型参数

荷载水平/%	蠕变				蠕变恢复		
	E_1/MPa	E_2/MPa	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	E'_1/MPa	E'_2/MPa	$\eta'_1/(\text{MPa}\cdot\text{h})$
10	406.62	711.11	531.86	—	406.62	720.38	1852.12
20	381.84	475.39	1656.88	—	385.75	478.60	1762.96
30	374.15	244.93	784.05	—	353.37	306.75	682.31
40	205.54	262.52	611.81	53866.31	190.53	331.86	627.10
50	192.61	164.97	381.58	28712.66	131.71	249.36	209.89
60	186.56	176.94	450.14	26936.52	143.26	228.82	387.86

3.2 模型参数求解与模型验证

本文建议的蠕变联合元件模型与蠕变恢复模型共有 7 个参数，其中弹性模量 E_1 ， E'_1 可通过蠕变与蠕变恢复试验数据直接获得；将不同厚度土工膜在各荷载水平下的蠕变与蠕变恢复试验数据分别代入式（4），（5）进行寻优迭代求解，可得蠕变与蠕变恢复模型其余参数。以 1.0 mm 厚土工膜参数为例，确定的计算参数见表 3。由表可见，随着荷载水平的增加，蠕变模型参数 E_2 ， η_2 均不断减小，表明当土工膜受荷载水平逐渐上升时变形表现得更加明显；而参数 η_1 随着荷载水平上升呈现为先增大后减小的趋势，表明在 10%荷载水平下 Kelvin 体发挥作用较小，即土工膜在 10%荷载水平下黏弹性特征相对不明显；在 20%荷载水平下 η_1 上升使土工膜表现为较强抗蠕变能力，随着荷载水平上升 E_2 ， η_2 持续减小，表明 Kelvin 体黏弹性发挥的作用逐渐提高，土工膜蠕变表现得更加明显。蠕变恢复模型参数 E'_2 ， η'_1 均随荷载水平升高不断减小，表明蠕变恢复过程中土工膜黏弹性随荷载水平升高逐渐凸显。

图 7 为不同荷载水平下不同厚度 HDPE 土工膜蠕变与蠕变恢复模型拟合曲线。由图可知，改进蠕变模型能较好反映不同荷载水平下土工膜蠕变过程，即较低荷载水平下能较好模拟土工膜最终蠕变应变量，在较高荷载水平下能较好模拟恒定应变速率的蠕变第二阶段。由三元件模型所得到的蠕变恢复模型，对较高荷载水平下土工膜蠕变恢复初期（0~10 h）模拟有所偏差，但模型能较好反映蠕变恢复第二阶段变形过程，并能准确模拟残余变形。



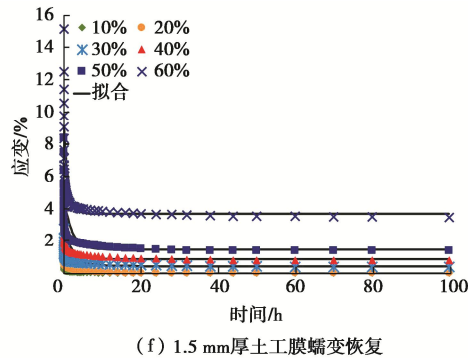


图 7 不同厚度 HDPE 土工膜试验值与模型曲线对比

Fig. 7 Comparison of test and simulated curves for HDPE geomembranes with different thicknesses

4 结 论

本文开展了不同荷载水平下 HDPE 土工膜加载蠕变与卸载蠕变恢复特性试验, 对加、卸载后土工膜蠕变性能的变化进行了较为深入研究, 并采用改进的联合元件模型对土工膜的蠕变变形与蠕变恢复过程进行了模拟分析, 得到 4 点结论。

(1) HDPE 土工膜的蠕变变形随时间不断增长, 所受荷载水平越高, 蠕变变形越大。荷载水平较低时, 土工膜会较快地进入稳定蠕变阶段, 随着荷载水平的升高, 土工膜将进入较长时间的恒定速率蠕变阶段, 恒定速率将随荷载水平的上升而增大。以 1.0 mm 厚土工膜为例, 在荷载水平 10%, 20%, 30% 时最终蠕变应变分别稳定于 0.42%, 1.03%, 2.21%, 稳定应变随荷载水平增大而升高; 在 40%, 50%, 60% 荷载水平下, 土工膜进入恒速蠕变阶段, 其速率分别为 0.006, 0.010, 0.014 mm/h, 蠕变速率随荷载水平升高近似呈线性增加。

(2) 对于蠕变恢复阶段的 HDPE 土工膜, 在卸掉荷载的初始阶段其应变曲线迅速下降, 随后缓慢下降并趋于稳定; 所受荷载水平越高, 蠕变恢复后土工膜产生的残余变形与其占比逐渐增大。以 1.0 mm 厚土工膜为例, 当所荷载水平低于 20% 时, 卸载后土工膜蠕变变形可完全恢复; 当荷载水平上升至 30%, 40%, 50%, 60% 时, 卸载后土工膜出现残余应变, 残余应变分别为 0.68%, 1.26%, 1.65%, 占总应变比例分别为 12.67%, 15.63%, 17.01%, 18.60%。

(3) 土工膜初始模量受荷载水平与蠕变过程的双重影响。较低荷载水平对土工膜初始模量影响较小; 当土工膜荷载水平上升至 40%~50% 时, 初始模量将显著下降超 100 MPa, 且土工膜进入第二阶段蠕变, 开始出现恒定速率蠕变; 较高荷载水平下蠕变恢复初始模量同时受荷载水平与蠕变过程的叠加影响, 其中

荷载水平使蠕变初始模量有约 40% 下降, 而经蠕变过程后进一步使蠕变恢复初始模量下降约 30%。

(4) 改进的蠕变联合元件模型将三元件、四元件模型相结合, 能较好反映不同荷载下土工膜的黏弹性蠕变过程, 即能较好表征较低荷载水平下土工膜达到最终的稳定蠕变量及较高荷载水平下第二阶段的恒速蠕变增长特性。蠕变恢复模型能较好反映不同荷载水平下土工膜蠕变恢复过程, 并能准确预测土工膜最终残余应变值。

参考文献:

- [1] MÜLLER W W. HDPE Geomembranes in Geotechnics[M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [2] BHOWMIK R, SHAHU J T, DATTA M. Failure analysis of a geomembrane lined reservoir embankment[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, **46**(1): 52 - 65.
- [3] NISHIGATA T, NISHIDA K, NISHIKAWA T, et al. Creep characteristic and estimation of long term strength of HDPE geomembrane liner in waste landfill[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2002, **61**(722): 75 - 83.
- [4] KOERNER R M, HSUAN Y G, KOERNER G R, et al. Ten year creep puncture study of HDPE geomembranes protected by needle-punched nonwoven geotextiles[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **28**(6): 503 - 513.
- [5] 王广月, 李华鑫, 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-xuan, LI Yan-qin. Experimental research on creep properties of composite geomembrane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1599 - 1603. (in Chinese))
- [6] 杨 武, 侍克斌, 何建新, 等. 不同膜厚复合土工膜的蠕变特性及模型研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(5): 955 - 961. (YANG Wu, SHI Ke-bin, HE Jian-xin, et al. Creep characteristics and model study of composite geomembrane with different film thicknesses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(5): 955 - 961. (in Chinese))
- [7] LEADERMAN H. Creep and creep recovery in plasticized polyvinyl chloride[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1943, **35**(3): 374 - 378.
- [8] HAO A Y, CHEN Y Z, CHEN J Y. Creep and recovery behavior of kenaf/polypropylene nonwoven composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, **131**(17): 40726.
- [9] 敬凌霄. 多轴向经编聚酯织物增强膜材力学性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2017. (JING Ling-xiao. Mechanical

- Property of Flexible Membrane Materials Strengthened by Polyester Multi-Axial Warp Knitted Fabrics[D]. Shanghai: Donghua University, 2017. (in Chinese))
- [10] 汪泽幸, 李 帅, 谭冬宜, 等. 循环加载处理对聚氯乙烯涂层膜材料蠕变性能的影响[J]. 纺织学报, 2021, 42(7): 101 - 107. (WANG Ze-xing, LI Shuai, TAN Dong-yi, et al. Effect of cyclic loading treatment on creep behavior of polyvinyl chloride coated membrane[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(7): 101 - 107. (in Chinese))
- [11] 颜世钊. 半晶态聚合物拉伸变形行为的微观机理[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. (YAN Shi-dang. Microscopic Mechanism of Tensile Deformation of Semicrystalline Polymer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese))
- [12] MONASSE B, QUEYROY S, LHOST O. Molecular Dynamics prediction of elastic and plastic deformation of semi-crystalline polyethylene[J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(1): 1111 - 1114.
- [13] LIU X L, HUANG Y J, DENG C, et al. Study on the creep behavior of polypropylene[J]. Polymer Engineering & Science, 2009, 49(7): 1375 - 1382.
- [14] CHENG J J, POLAK M A, PENLIDIS A. An alternative approach to estimating parameters in creep models of high-density polyethylene[J]. Polymer Engineering & Science, 2011, 51(7): 1227 - 1235.
- [15] LIU H T, POLAK M A, PENLIDIS A. A practical approach to modeling time-dependent nonlinear creep behavior of polyethylene for structural applications[J]. Polymer Engineering & Science, 2008, 48(1): 159 - 167.
- [16] ZHAO X, ZHANG Q H, CHEN D J, et al. Enhanced mechanical properties of graphene-based poly(vinyl alcohol) composites[J]. Macromolecules, 2010, 43(5): 2357 - 2363.
- [17] LI Y Q, YANG T Y, YU T, et al. Synergistic effect of hybrid carbon nanotube-graphene oxide as a nanofiller in enhancing the mechanical properties of PVA composites[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21(29): 10844 - 10851.
- [18] SAWICKI A, KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA K. Creep behaviour of geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1998, 16(6): 365 - 382.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)