

文章编号: 1000-7598-(2009) 06-1599-05

复合土工膜蠕变性能的试验研究

王广月, 李华奎, 李艳琴

(山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘 要: 为了了解复合土工膜在长期荷载作用下的蠕变性能, 对两布一膜土工合成材料的蠕变问题进行了 4 级荷载下的蠕变试验研究, 通过理论分析建立了两布一膜土工合成材料蠕变方程。结果表明: 两布一膜的蠕变特性与承受的荷载有关, 当荷载越大, 蠕变应变越大; 在恒载长期拉伸作用下, 两布一膜表现出很强的横向收缩特性, 并且颈缩量的大小与荷载成正比; 低于 60 % 极限荷载作用, 材料强度仍然保持在 70 % 左右, 可视为可靠而不影响工程的稳定性。

关 键 词: 复合土工膜; 蠕变; 极限荷载; 蠕变模型

中图分类号: TU 411.3

文献标识码: A

Experimental research on creep properties of composite geomembrane

WANG Guang-yue, LI Hua-luan, LI Yan-qin

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: Creep tests under four-step loading to predict long term creep behavior of composite geomembrane are examined. Based on theoretical analysis, a creep model for composite geomembrane is established, which shows the relationship between creep behavior of composite geomembrane and loading. The creep strain increases with the increase of loading. Under long term tensile dead load, the composite geomembrane presents strong lateral contraction property, and the necking magnitude is proportional to the load. When the material strength remains around 70 % under ultimate load less than 60 %; the material can be seen reliable, it has no influence on structural reliability.

Key words: composite geomembrane; creep; ultimate load; creep model

1 前 言

蠕变是土工合成材料的抗拉能力能否长期发挥作用的关键, 也是土工合成材料应用于永久性加筋土结构中的重要特性。土工布由聚乙烯、聚丙烯、涤纶、锦纶等纤维聚合物组成, 若置于土中, 其蠕变特性影响加筋土结构的长期性状, 蠕变或应力释放可能引起加筋土结构内部应力状态的改变, 导致丧失稳定或过大的变形, 因此, 研究土工布的抗蠕变性并预测其长期蠕变对于结构的安全性和经济型至关重要。国内外已有一些关于土工合成材料蠕变方面的文献, 文献[1-2]借助时温等效原理研究了土工合成材料的时间-荷载-温度关系, 欲从短期的高温下蠕变获得长期的常温下土工格栅的蠕变性能。文献[3]也对科罗拉多州已经使用 11 年的 4 种

无纺布土工织物加筋土挡土墙的筋材取样, 测试其强度等性能的长期效应。文献[4]对加筋土工合成材料长期荷载蠕变进行了进行了 10 000 h 研究, 并根据蠕变系数法得出了不同土工合成材料在不同的荷载水平下的延伸率 ε 和斜率 λ 值。在诸多土工合成材料中, 其中一部分材料的蠕变特性已经进行了相当数量的试验和理论研究。其中大部分为单纯的土工布、土工格栅等, 但鲜有人通过试验研究复合土工膜(两布一膜)的蠕变特性。复合土工膜结合土工布和土工膜的特点, 土工布发挥其隔离、加筋、防护、防渗特性, 配合土工膜优异的防渗性能广泛用于大坝或防洪一类的重要工程, 使用过程是一个长期蠕变的过程, 蠕变特性是影响复合土工膜材料稳定性的重要因素, 因此, 有必要对两布一膜的蠕变问题进行研究。

收稿日期: 2007-06-26

第一作者简介: 王广月, 男, 1963 年生, 教授, 主要从事岩土力学和地基基础教学与研究工作。E-mail: wgyue@sdu.edu.cn

2 试验方法

2.1 蠕变测试标准及试验条件

根据土工合成材料测试规程^[5]规定, 本研究采用两布一膜的尺寸为 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 测试温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(60 \pm 10)\%$ 。共有 4 台仪器, 每台仪器保持独立, 互不干扰, 当对一台仪器的试样加荷, 或某一台仪器的试样发生断裂而引起的颤抖或振动对周边的试验无影响。本试验采用砝码加载, 试验材料经测定, 断裂强度为 9.0 kN/m 。本试验采取 20 %、40 %、60 %、80 % 断裂荷载 4 级荷载。

2.2 蠕变测试系统

蠕变测试系统由加载系统(自制)、电测系统、数据采集系统 3 部分组成。蠕变试验采用自制的 RB-0408 土工合成材料蠕变试验仪, 如图 1 所示。夹持土工布的上下夹具钳口是一个光滑的“弓”字形, 这样既防止试样在钳口内打滑, 又防止试样在钳口内被破坏; 并且下夹具和砝码托盘合而为一, 以方便加荷。试验前应先称量加荷盘与下夹具的重量。悬重物采用的是砝码代替, 有利于保持荷载的恒定性。本试验采用的砝码有 5、10、20 kg 3 种, 以满足悬重物的要求组合试验中的各级荷载。砝码托盘上端接夹具, 下端可以盛放砝码。试验中用来测量试样变形量的是电子数显指示表, 精确度达 0.01 mm , 能自动显示变形量的大小, 并通过外接数据线和专用适配器与电脑相连接, 自动将数据传入电脑中, 以文本格式存储, 减小了由于加载初期时间因素带来的数据误差。

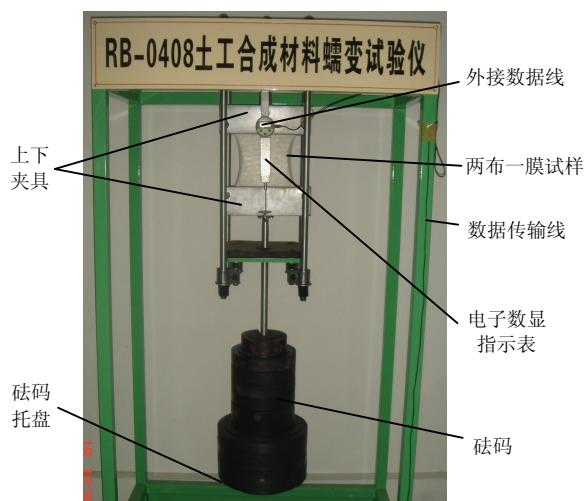


图 1 RB-0408 土工合成材料蠕变试验仪

Fig.1 RB-0408 earthwork synthetic material creep test instrument

3 蠕变试验结果和分析

3.1 蠕变曲线

不同应力水平下应变随时间的变化曲线如图 2、3 所示。从图中可看出, 在较高应力水平下的应变都始终大于低应力水平下的应变, 在低应力水平下, 蠕变曲线较平缓, 应变增长较慢, 且很快达到稳态阶段。随应力的增大, 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。

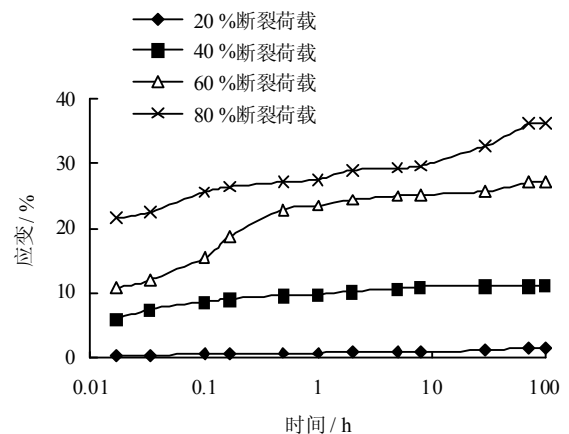


图 2 试样在 100 h 内的蠕变曲线

Fig.2 Sample creep curves in 100 h

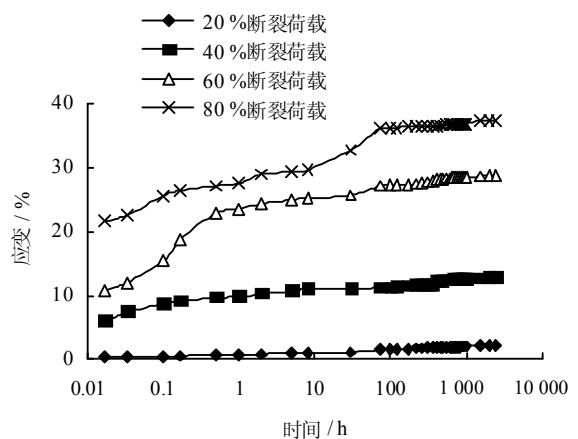


图 3 试样在 10 000 h 内的蠕变曲线

Fig.3 Sample creep curves in 10 000 h

3.2 应力-时间的变化关系

在复合土工布长期受载蠕变过程中, 应力也会随时间的变化而变化, 它是影响工程稳定性的一个关键因素。在研究应变与时间的关系的同时, 有必要研究应力与时间的变化规律, 如图 4 所示。

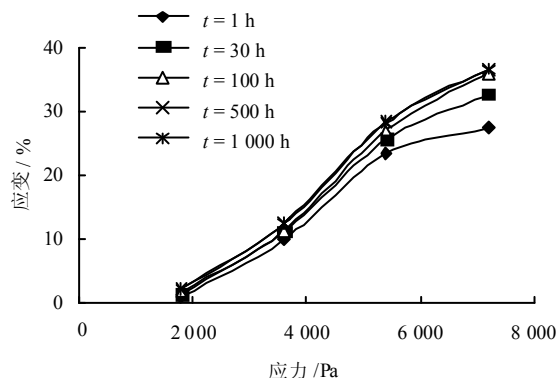


图4 等时应力-应变关系图

Fig.4 Isochronous stress-strain relation curves

从图中可以看出, 本试验材料的应变随应力增加而增大, 应变和应力成正比关系, 并且各等时应力-应变曲线形状大致相同, 说明应力-应变的关系受时间影响很小。

图5为2%、4%、6%、8%、10%的时间与应力的关系, 从图中可以看出, 在不同的应变下, 应力-时间的变化规律是相同的。

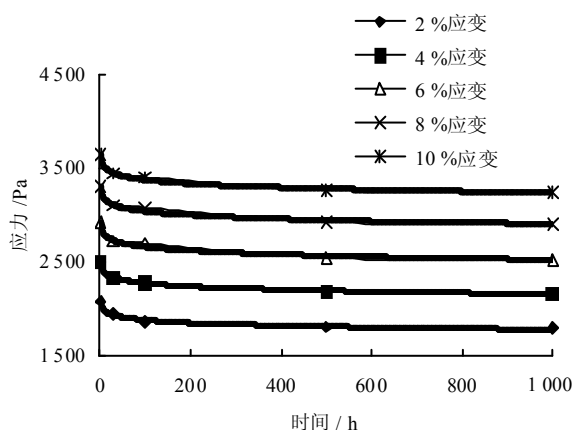


图5 应力-时间关系图

Fig.5 Stress-time relationship curves

3.3 横向变形

试样在荷载长期恒定的拉伸作用下, 表现出很强的横向收缩特性。其中试样3、4在加载后就出现了明显的颈缩现象, 试样2在长期恒定拉伸作用下渐渐出现了轻微的蠕变现象。试样1由于荷载水平较低, 很长一段时间内, 颈缩现象仍不明显。试样2 500 h材料缩颈百分比与荷载的关系见图6。

4 蠕变试验数据的拟合

4.1 蠕变模型

复合土工膜的基材大都为: PET (涤纶)、PP (丙纶)、PA (锦纶)、PV (维纶)、PE (乙纶),

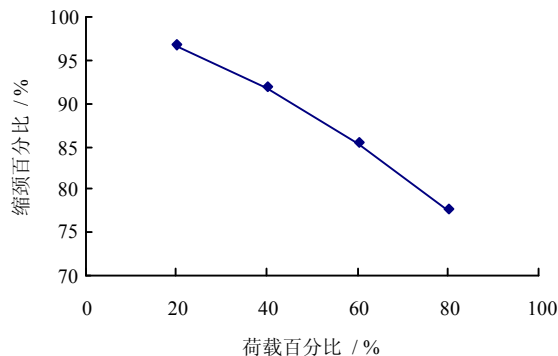


图6 试样2 500 h材料缩颈百分比与荷载的关系

Fig.6 Sample material necking percentage-load relationship in 2500 h

膜材有PE (聚乙烯)、PVC (聚氯乙烯)、CPE (氯化聚乙烯), 这些材料都属于高分子材料。高分子材料有明显的蠕变性, 一般来说, 在分子材料蠕变过程中, 外力所做的功转化为分子的热运动, 产生使材料变形或破坏的能量。因此, 把高分子材料的蠕变当做一种热力学过程^[6-7], 可用下列公式表示:

$$\dot{\varepsilon} = c \exp\left(\frac{-\Delta H}{RT}\right) \sigma^m t^n \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; ΔH 为活化能; R 为 Boltzman 常数; m 、 n 为材料常数。从上式可以看出, 应变与时间的关系可以表示幂函数关系:

$$\varepsilon = c_1 \sigma^m t^{c_2} \quad (2)$$

式中: c_1 与应力、材料的活化能、Boltzman 常数等有关, 量纲为 ($\text{mN}^{-1}\text{S}^{-1}$); c_2 与应力、材料和形状有关, 是无量纲参数。

由式 (2) 可以近似认定应变与时间的关系为

$$\varepsilon = at^b \quad (3)$$

比较式 (1)、(2) 可以得出:

$$\left. \begin{aligned} a &= c_1 \sigma^m \\ b &= c_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

4.2 蠕变关系曲线

可以看出, a 与应力有关, 随应力的变化而变化。各个试样的应力和其相对应的 a (由前面的幂函数拟合曲线所得) 的关系见表1, 并采用幂函数拟合, 应用式 (2) ~ (4), 通过计算机进行数据处理后, 得到稳定阶段不同应力水平的蠕变关系曲线如图7~9。

表1 应力和系数 a 的关系Table 1 Relation between stress and coefficient a

应力/Pa	$a/(1/h)$	应力/Pa	$a/(1/h)$
1 800	0.734	5 400	19.849
3 600	9.307	7 200	27.714

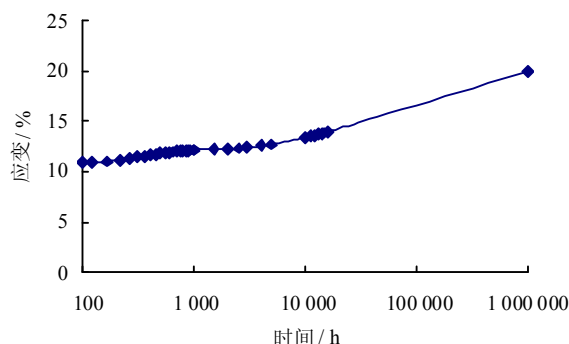


图7 40%极限荷载的应变-时间关系

Fig.7 Strain-time relationship under 40% ultimate load

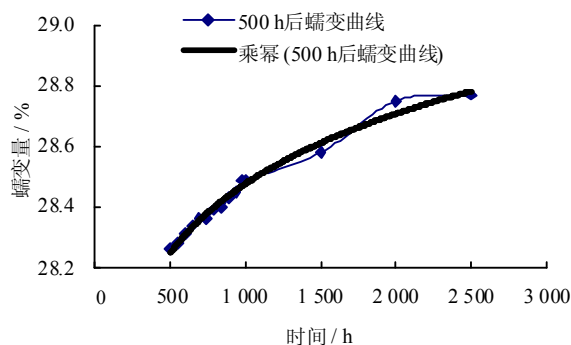


图8 60%极限荷载的应变-时间关系

Fig.8 Strain-time relationship under 60% ultimate load

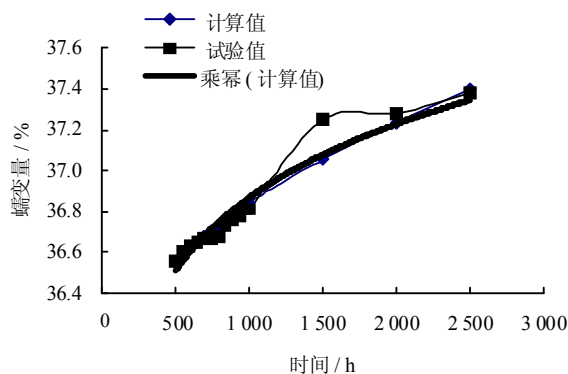


图9 80%极限荷载的应变-时间关系

Fig.9 Strain-time relationship under 80% ultimate load

4.3 蠕变量的长期预测

通过公式计算值,用 Origin 内置函数进行多次拟合比较,最后得出的拟合曲线方程为

(1) 当荷载水平为 40%时

$$\varepsilon = 2 \times 10^{-9} \sigma^{2.669} t^{0.1948} t^{-0.096} \quad (5)$$

(2) 当荷载水平为 60%时

$$\varepsilon = 26.268 t^{0.0117} \quad (6)$$

(3) 当荷载水平为 80%时

$$\varepsilon = 33.469 t^{0.014} \quad (7)$$

式(5)中试样的蠕变量随时间逐渐变大,通常认为,土工布蠕变应变 $\leq 45\%$ 是安全的,选 $t = 10^6$ h(约114年),此时的应变为20%,小于最大允许蠕变量45%,视为是可靠的。于是,两布一膜可以使用在40%极限荷载作用下的实际工程中,并不影响其稳定性及安全性。

式(6)为单调递增函数,蠕变量随时间的增长而逐渐增大,则根据本公式外推 10^6 h时蠕变量的大小为

$$\varepsilon_{10^6 h} = 26.268 t^{0.0117} = 26.268 \times 1\,000\,000^{0.0117} = 30.88\% \quad (8)$$

根据统计误差分析,用外推法求得的数据应除以外推不确定因子

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{1.2^{x-1}} \quad (9)$$

式中: 1.2^{x-1} 为外推不确定系数; x 为外推 lg 循环数, x 小于 1 时取 1。

$$\varepsilon' = \frac{30.88}{1.2^{2.6-1}} = 23.07\% \quad (10)$$

在只考虑蠕变的情况下,材料强度仍然保持在70%左右,视为可靠的,不影响工程的稳定性。

式(7)为试样4长期蠕变变量的公式。此函数也具有单调递增性,蠕变量随时间的增长而增大。

根据公式外推 10^6 h时蠕变量为

$$\varepsilon_{10^6 h} = 33.469 t^{0.014} = 33.469 \times 1\,000\,000^{0.014} = 40.61\% \quad (11)$$

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_{10^6 h}}{1.2^{x-1}} = \frac{40.61}{1.2^{2.6-1}} = 30.33\% \quad (12)$$

此时材料的强度在70%左右,理论上来说可以满足工程的需求,但由于应用中多种因素影响材料的蠕变性能,且影响程度无法判断,因此,

应避免在实际工程中使两布一膜承受80%及以上极限荷载的作用。

5 结论

(1) 两布一膜的蠕变特性与承受的荷载有关,当荷载越大,蠕变应变越大。

(2) 在恒载长期拉伸作用下,两布一膜表现出很强的横向收缩特性,并且颈缩量的大小与荷载成正比。

(3) 短纤针刺非织造复合土工膜在20%极限荷载的长期作用下,蠕变量很小,完全不影响工程的稳定性和耐久性;在40%极限荷载的情况下,有一定的蠕变现象,但对工程的稳定性没有大的影响;

而在 60 % 极限较高荷载作用下, 在只考虑蠕变的情况下, 材料强度仍然保持在 70 % 左右, 视为是可靠的, 不影响工程的稳定性; 在 80 % 高极限荷载作用下, 理论上来说可以满足工程的需求, 但由于应用中多种因素影响材料的蠕变性能, 且影响程度无法判断, 因此, 应避免在实际工程中使两布一膜承受 80 % 及以上极限荷载的作用。

参考文献

- [1] BLACK P J, HOLTZ R D. Performance of geotextile separators five years after installation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1995(5): 404—412.
- [2] 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: 863—885.
- [3] KHALID F, ACAR Y B, JURAN I. Pull-out resistance of geogrid reinforcements[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 1993, 12(2): 133—159.
- [4] SOONG T Y, KOERNER R M. Modeling and extrapolation of creep behavior of geosynthetics[C]// **Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics**, Atlanta. Roseville: IFAI, 1998: 707—718.
- [5] 南京水利科学研究院/中国土工合成材料工程协会. SL/T123—1999 土工合成材料测试规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [6] DU Z K, JU J B. Distributed content-aware request distribution in cluster-based Web servers[C]// **Proceedings of the 4th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies**, PDCAT 2003. Chengdu: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003.
- [7] HUNG J C, CHANG A Y, LIU K C, et al. Mobile distributed Web server system[C]// **Proceedings of the 1st International Symposium on Cyber Worlds**. CW2002, Tokyo: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2002.

上接第 1598 页

参考文献

- [1] 徐至钧, 胡中雄, 潘林有. 软土地基和预压法地基处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 丁红岩, 张超. 筒型基础负压沉贯流固耦合渗流分析模型[J]. **岩土力学**, 2006, 27(9): 1495—1500.
DING Hong-yan, ZHANG Chao. Fluid-solid coupling flow analytical model of bucket foundation suction penetration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1495—1500.
- [3] 吴雄志. 考虑渗流力时对太沙基一维固结理论的修正[J]. **岩土力学**, 2004, 25(8): 1279—1282.
WU Xiong-zhi. Modification of Terzaghi's one-dimensional consolidation theory by considering seepage force[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1279—1282.
- [4] 高小育, 廖红建, 丁春华. 渗流对土质边坡稳定性的影响[J]. **岩土力学**, 2004, 25(1): 69—72.
GAO Xiao-yu, LIAO Hong-jian, DING Chun-hua. Seepage effects on soil slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(1): 69—72.
- [5] 平扬, 白世伟, 徐燕萍. 深基坑工程渗流-应力耦合分析数值模拟研究[J]. **岩土力学**, 2001, 22(1): 37—41.
- [6] PING Yang, BAI Shi-wei, XU Yan-ping. Numerical simulation of seepage and stress coupling analysis in deep foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(1): 37—41.
- [7] 张功新. 真空预压加固大面积超软弱淤泥土试验研究及实践[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [8] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior (2nd edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [10] 宋晓岚, 黄学辉. 无机材料科学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] R. E. 格里姆著. 粘土矿物学[M]. 许冀泉译. 北京: 地质出版社, 1960.
- [12] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [13] 谭罗荣. 蒙脱石晶体膨胀和收缩机理研究[J]. **岩土力学**, 1997, 18(3): 13—18.
TAN Luo-rong. Study on mechanism of expansion and shrinkage of the montmorillonite crystal[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(3): 13—18.