

加速土工合成材料蠕变试验的荷载叠加法

第六图书馆

根据自由体积理论证明了温度、应力与分子运动的关系,在分析了时温叠加法原理的基础上,阐述了荷载叠加法的原理,提出了加速土工合成材料蠕变试验和预测其长期特性的荷载叠加法和荷载转移公式因子。对RS50土工格栅的室内蠕变试验结果作了分析,利用荷载叠加法把几种不同荷载水平下的蠕变试验曲线形成了几条光滑的主曲线。由此得出了设计使用年限下的应力-应变曲线,计算出了RS50格栅的蠕变折减系数,为工程设计提供了依据。根据自由体积理论证明了温度、应力与分子运动的关系,在分析了时温叠加法原理的基础上,阐述了荷载叠加法的原理,提出了加速土工合成材料蠕变试验和预测其长期特性的荷载叠加法和荷载转移公式因子。对RS50土工格栅的室内蠕变试验结果作了分析,利用荷载叠加法把几种不同荷载水平下的蠕变试验曲线形成了几条光滑的主曲线。由此得出了设计使用年限下的应力-应变曲线,计算出了RS50格栅的蠕变折减系数,为工程设计提供了依据。土工合成材料 蠕变 荷载叠加岩土工程学报李丽华 王钊 陈轮 [1]清华大学水利水电工程系,北京100084 [2]武汉大学土木建筑工程学院,湖北武汉4300722007第六图书馆

第六图书馆

www.6lib.com

加速土工合成材料蠕变试验的荷载叠加法

李丽华¹, 王 钊², 陈 轮¹

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 根据自由体积理论证明了温度、应力与分子运动的关系, 在分析了时温叠加法原理的基础上, 阐述了荷载叠加法的原理, 提出了加速土工合成材料蠕变试验和预测其长期特性的荷载叠加法和荷载转移公式因子。对 RS50 土工格栅的室内蠕变试验结果作了分析, 利用荷载叠加法把几种不同荷载水平下的蠕变试验曲线形成了几条光滑的主曲线。由此得出了设计使用年限下的应力-应变曲线, 计算出了 RS50 格栅的蠕变折减系数, 为工程设计提供了依据。

关键词: 土工合成材料; 蠕变; 荷载叠加

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)03-0410-04

作者简介: 李丽华(1980-), 女, 湖北孝感人, 博士后, 主要从事土工合成材料应用的学习和研究。E-mail: llllhua466@163.com。

Load superposition for accelerating creep test of geosynthetics

LI Li-hua¹, WANG Zhao², CHEN Lun¹

(1. Department of Hydraulic Engineering of Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Civil and Architectural Engineering of Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The relationship of temperature and stress to molecular motion was approved according to the free volume theory in this paper. On the basis of time-temperature superposition, the principal shift formula and factor of load superposition were represented, which could accelerate creep test of geosynthetics and predict its long term behaviour. The laboratory creep test of geogrid RS50 were analyzed. Smooth primary curves were formed with the help of creep test curves at different load levels through load superposition method. Stress-strain curves at the end of designed life and creep reduction factor of geogrid RS50 are determined, which could be used as reference for engineering design.

Key words: geosynthetics; creep; load superposition

0 引 言

土工合成材料的蠕变关系到加筋土结构的变形和正常运行, 必须作为一项长期特性指标来研究。土工合成材料蠕变性能的研究目前正逐步受到重视, 但目前对土工合成材料蠕变性能的研究都只限于长期的室内蠕变试验研究和蠕变模型研究。土工合成材料的蠕变特性是一个长期的过程, 因此蠕变试验需要很长的时间一般是至少 1000 h, 即使是按照规范做了 1000 h 的蠕变试验, 对其设计使用年限时的蠕变特性研究还是只能用外推法或借助于经验公式。因此如何快速评判土工合成材料长期的蠕变特性, 如何缩短蠕变试验时间的研究变得非常有意义。本文从荷载水平的角度出发, 研究了应力对蠕变特性的影响, 对照温度转换的方法讨论了同种温度下不同荷载水平下蠕变曲线之间相互转换的原理、方法和具体试验的结果, 提出了一种新的荷载叠加法预测了 RS50 土工格栅设计使用年限下的长期蠕变特性, 利用此方法计算出了 RS50

土工格栅的蠕变折减系数。

1 荷载叠加法的原理及推导

1.1 温度转换原理

时温叠加法中 WLF 方程主要由聚合物的自由体积理论演化而来, 自由体积的变化将影响材料的流动性并直接影响到依赖于时间效应的力学特性, 自由体积越大, 分子的活动性越大。很多学者都证明温度转移因子跟自由体积相关, 提出了公式^[2]

$$\ln \alpha_T = A + B/(\tilde{V} - 1) \quad (1)$$

式中 A , B 为材料常数; α_T 为温度转移因子;

$$\tilde{V} = \frac{V}{V - V_f} \quad (2)$$

其中, V 为总体积, V_f 为自由体积。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50279036)

收稿日期: 2005-12-22

WLF 方程^[3] $\log \alpha_T = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)}$ 即由式 (1)

演化而来, 是其特例, WLF 方程只适用于温度在 $T_g - T_g + 50\text{K}$ 的范围内 (T_g 为材料的玻璃化温度, 而式 (1) 适用于所有的温度范围。

1.2 荷载叠加原理

土工合成材料承受外加荷载导致变形, 其重要的变化过程为: 施加荷载后能量通过分子链传递, 部分分子的运动起到传递能量给相邻分子链的作用, 分子链发生变形重排, 分子的黏结拉伸、角度的变化导致弹性能量的储存, 所有这些运动变化过程都与分子的自由体积有关, 自由体积越大分子运动得越快, 当升高温度时自由体积变大, 从而加快分子运动的能力。这就是从高温下短期试验预测低温下长期特性的原理。任何改变自由体积的方法都能用来预测长期特性, 同样, 应力水平也影响自由体积的变化, 从而影响分子运动能力。当施加荷载时正如升高温度那样加速了蠕变过程, 蠕变反映出了承受荷载水平的能力。

由自由体积理论可知应力影响自由体积的变化, 据此 Brostow(2001)提出了自由体积与应力水平之间的关系式^[2]

$$\ln \alpha_\sigma = \ln [V(\sigma)/V_{\text{ref}}] + B[(\tilde{V}-1)^{-1} - (\tilde{V}_{\text{ref}}-1)^{-1}] + C(\sigma - \sigma_{\text{ref}}) \quad (3)$$

式中 B 为材料常数, 与式 (1) 中相同; C 为应力对分子链结构的影响系数; V 为总体积; V_{ref} 为参考状态时的总体积; σ 为应力; σ_{ref} 为参考状态下的应力。由式 (2)、(3) 可知, 应力同样影响自由体积的变化, 因此与时温叠加法一样, 升高温度加快蠕变, 增大荷载水平 (指拉应力增加) 也可以加快蠕变或应力松弛。跟做几种不同温度下的蠕变试验一样, 可以做几种不同应力下的短期蠕变试验来预测长期特性。

1.3 荷载转移因子推导

有关黏度的分子理论是极为复杂的, 但总可以把黏度看作是分子间相互运动时的阻力。因此如果分子间有较大的活动空间, 运动阻力就小, 黏度也小, 也就是说黏度是与它本身的自由体积有关^[4]。Doolittle (1983) 根据黏度理论和自由体积理论给出了黏度和自由体积分数之间的关系^[5-6]

$$\eta = A' \exp \left[B \left(\frac{1}{f} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中 η 为材料黏性系数, 能反应与自由体积有关的时间效应; f 为自由体积分数, $f = \frac{V_f}{V}$; A', B 为材料常数, B 与式 (1) 中相同。因此根据前述荷载叠加的原理和式 (4), 可假定应力对自由体积的影响与

温度产生的影响相似, 即自由体积分数可表示为^[7]

$$f = f_0 + \alpha_t(T - T_0) + \alpha_\sigma(\sigma - \sigma_0) \quad (5)$$

式中 α_σ 为应力对自由体积的影响系数; α_t 为温度对自由体积的影响系数, 对同一材料为常数; f_0 为参考状态下的自由体积分数; T_0 为参考状态下的温度; T 为温度; σ_0 为参考状态下的应力, 与上述 σ_{ref} 意义相同; σ 为应力。假定存在温度-应力转移因子 $\varphi_{T\sigma}$ 满足

$$\eta(T, \sigma) = \eta(T_0, \sigma_0) \varphi_{T\sigma} \quad (6)$$

把式 (5) 代入式 (4) 得

$$\eta(T, \sigma) = A' \exp \left[B \left(\frac{1}{f_0 + \alpha_t(T - T_0) + \alpha_\sigma(\sigma - \sigma_0)} - 1 \right) \right]$$

$$\eta(T_0, \sigma_0) = A' \exp \left[B \left(\frac{1}{f_0} - 1 \right) \right]$$

把上两式代入式 (6) 得

$$\varphi_{T\sigma} = \exp \left[B \left(\frac{1}{f_0 + \alpha_t(T - T_0) + \alpha_\sigma(\sigma - \sigma_0)} - \frac{1}{f_0} \right) \right]$$

$$\ln \varphi_{T\sigma} = B \left[\frac{-\alpha_t(T - T_0) - \alpha_\sigma(\sigma - \sigma_0)}{f_0^2 + \alpha_t f_0(T - T_0) + \alpha_\sigma f_0(\sigma - \sigma_0)} \right]$$

故可得

$$\log \varphi_{T\sigma} = \frac{f_0}{\alpha_\sigma} \frac{\alpha_t(T - T_0) + \alpha_\sigma(\sigma - \sigma_0)}{f_0^2 + \alpha_t f_0(T - T_0) + \alpha_\sigma f_0(\sigma - \sigma_0)} - 0.434 B \left[\frac{C_3(T - T_0) + C_2(\sigma - \sigma_0)}{C_2 C_3 + C_3(T - T_0) + C_2(\sigma - \sigma_0)} \right] \quad (7)$$

$$\text{式中 } C_1 = \frac{0.434 B}{f_0}, C_2 = \frac{f_0}{\alpha_t}, C_3 = \frac{f_0}{\alpha_\sigma}$$

当应力恒定时式 (7) 变为

$$\log \varphi_T = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (8)$$

当温度恒定为参考温度 T_0 时, 式 (7) 变为

$$\log \varphi_\sigma = -\frac{C_1(\sigma - \sigma_0)}{C_3 + (\sigma - \sigma_0)} \quad (9)$$

式 (9) 即为荷载转移因子的计算式, 与温度转移因子 WLF 方程相似。同时由式 (7) 得出了式 (8) 温度转移因子表达式与 WLF 方程相符合, 说明了计算推导的正确性。式中 φ_σ 为荷载转移因子。

2 蠕变试验

笔者于 2005 年 7 月 8 号开始对典型的加筋材料单向高密度聚乙烯土工格栅 (RS50HDPE, 由湖北力特塑料制品有限公司提供) 做了室内蠕变试验。试验目

的是研究应力水平对蠕变的影响, 尽量利用少量较短时期蠕变试验数据根据荷载叠加法推求设计使用年限下的长期蠕变特性, 计算出蠕变折减系数。试验在武汉大学岩土试验大厅进行, 试验温度为室内温度, 格栅施加的荷载水平分别为抗拉强度的 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 60%; 试样特性指标及尺寸如表 1 所示, 试验所得蠕变曲线如图 1 所示。

表 1 土工格栅特性指标

Table 1 Characteristic index of the geogrid

型号	克重 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	强度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	伸长 率/%	长 /mm	宽 /mm
格栅	RS50	433	53.55	11.8	155

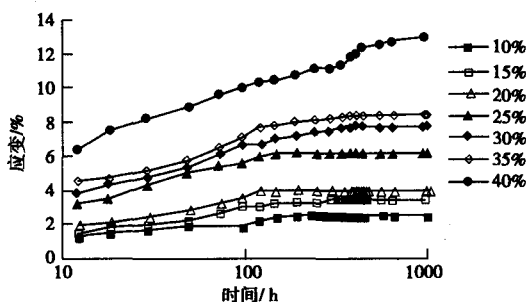


图 1 格栅蠕变试验图

Fig. 1 Creep test curves of geogrid

由图 1 可知, 所有荷载水平下试样的应变随时间增加而增加, 所有试样在 35% 荷载水平以下曲线的斜率在约 200 h 后变得很平缓, 说明当试样承受 35% 荷载水平以下时蠕变应变增长非常缓慢, 但当格栅承受 40% 荷载水平时蠕变应变增长非常迅速。另外笔者还做了 60% 荷载水平下的蠕变试验, 蠕变也发展得非常迅速以至在 600 h 后断裂, 且蠕变量立即超过 10%, 故不能用于后面的荷载叠加法中, 因此在图 1 中没有给出。说明当荷载水平较低时试样都只经历了两个阶段的蠕变, 当荷载水平较高时蠕变发展到了第三阶段。

3 荷载叠加法用于蠕变试验

依据前述自由体积和应力之间的关系原理和荷载转移因子可知, 增大荷载水平也可以加快蠕变或应力松弛, 同样可如温度转移一样, 把几种不同荷载水平下的蠕变曲线平移到参考荷载水平下的曲线上, 形成一条光滑的主曲线。本试验中分别选取荷载水平 10%, 15%, 20%, 30% 为参考应力, 平移试验曲线所得的几种荷载水平下的主蠕变曲线图分别见图 2~5。

由图 2~5 可知, 根据荷载叠加原理, 土工格栅在同种温度下三种不同荷载水平下的蠕变曲线沿水平时间对数轴平移成了一条主曲线 (平移时使后段曲线头和前段曲线尾重叠光滑连接, 依据已经广泛应用的时温叠加法), 10% 荷载水平下的主曲线由 10%, 15%,

20% 三段曲线组成, 15%, 20% 两段曲线的荷载转移因子分别为 2 和 2.6; 15% 荷载水平下的主曲线由 15%, 20%, 25% 三段曲线组成, 20%, 25% 两段曲线的荷载转移因子分别为 1.4 和 2.9; 20% 荷载水平下的主曲线由 20%, 25%, 30% 三段曲线组成, 25%, 30% 两段曲线的荷载转移因子分别为 1.5 和 2.3; 30% 荷载水平的主曲线由 30%, 5%, 40% 三段曲线组成, 35%, 40% 两段曲线的荷载转移因子分别为 1.1 和 3.0。可见四条主曲线都由三段组成, 尽管每条主曲线每两段之间荷载水平相差都为 5% 和 10%, 但其荷载转换因子却有差别, 共同的规律是荷载水平相差 10% 时转移因子比相差 5% 时要大, 荷载转移因子随荷载水平的增加而增加。图中土工格栅用 3 种不同荷载水平下的蠕变曲线连成主曲线后, 可以预测的时间变为 $t=10^6$ (h) = 114 (a), 由此完全可以预测出土工格栅设计年限下的长期蠕变特性。

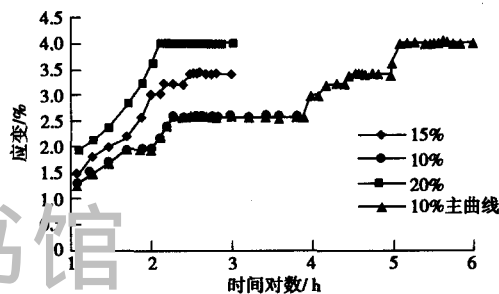


图 2 10% 荷载水平下主曲线图

Fig. 2 Primary curve at 10% load level

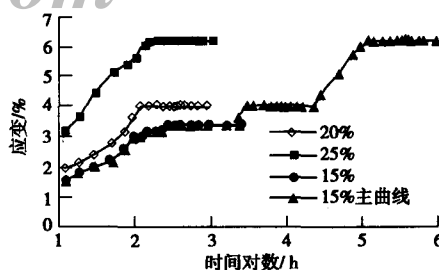


图 3 15% 荷载水平下主曲线图

Fig. 3 Primary curve at 15% load level

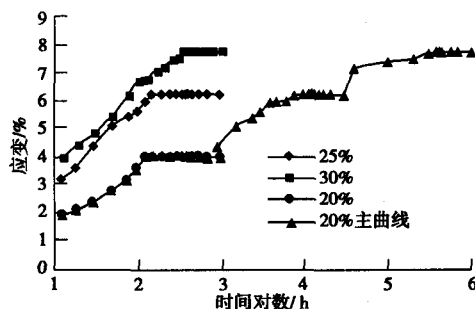


图 4 20% 荷载水平下主曲线图

Fig. 4 Primary curve at 20% load level

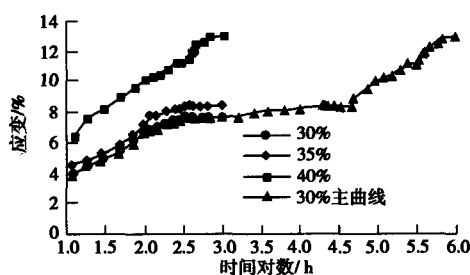


图5 30%荷载水平下主曲线图

Fig. 5 Primary curve at 30% load level

由上述可知, 每条主曲线由三段组成, 每两段之间荷载水平相差都分别为 5% 和 10%, 其对应的荷载转移因子平均值分别为 1.5 和 2.7。现根据式 (9) 利用该格栅的试验结果计算出系数 C_1 , C_3 的值。试验格栅为单根肋条, 肋条宽 6.2 mm, 肋条厚 1.2 mm, 抗拉强度为 53.55 kN/m, 每米 44 根肋条, 故单根为 1.217 kN。故荷载水平相差 5% 对应的荷载转移因子为 1.5, 计算得对应的应力差 ($\sigma - \sigma_0$) 为 8.178 MPa; 同理荷载水平相差 10% 对应的荷载转移因子为 2.7, 对应的应力差为 16.356 MPa, 分别把这两组荷载转移因子和相应的应力差代入式 (9) 得出系数 $C_1 = 13.5$, $C_3 = 65.4$ 。由此计算出了 RS50 单向格栅荷载转移因子公式系数的参考值。荷载叠加过程中此系数只能当应力差值较小时参考用, 荷载水平相差太大时不能用于转移叠加否则误差太大。

4 荷载叠加法计算蠕变折减系数

运用图 2~5 中的蠕变主曲线可求得土工格栅在 10^6 小时的应力-应变曲线 (等时曲线), 并求得蠕变折减系数。具体作法如下, 从图中查得四种参考荷载水平下对应于 10^6 h 的应变分别为 4.0%, 7.1%, 7.7% 和 13%, 绘制荷载应变曲线如图 6 所示。

根据蠕变应变的设计容许值例如 10%, 从图 6 查得长期蠕变强度为 13 kN/m, RS50 土工格栅抗拉强度为 53.55 kN/m, 故蠕变折减系数

$$RF_{CR} = \frac{53.55}{13} = 4。$$

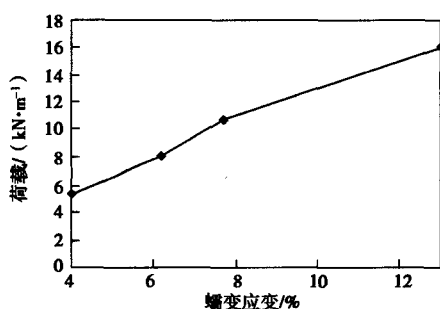


图6 蠕变的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain creep curve at 10^6 h

5 结 语

本文提出了一种与时温叠加法原理相似的荷载叠加法, 从自由体积理论着手分析了荷载相互转移叠加的原理, 提出了荷载转移公式因子。分析了 RS50 单向土工格栅的室内蠕变试验研究结果, 根据荷载叠加原理把不同荷载水平下的蠕变曲线形成了主曲线。由此得出了设计使用年限下的荷载应变曲线, 计算得出 RS50 格栅蠕变折减系数为 4, 为工程设计提供了依据。由此可见, 可以利用荷载叠加法做常规蠕变试验以预测土工合成材料的长期蠕变特性。利用荷载叠加法预测土工合成材料蠕变曲线的过程中, 应尽量选取不同级别的荷载水平, 且不少于三组。在高荷载水平下蠕变发展迅速不能用于转移否则会引起很大误差。另外, 由前述自由体积理论可知, 温度和应力水平都可以影响分子运动能力从而影响蠕变特性 (见式 (4) 和 (6))。时温叠加法现已经应用较成熟, 只是试验条件温度难以达到, 如果把时温叠加法和荷载叠加法结合起来应用, 则每组试验需要的时间更短且能得出可以预测很长时间蠕变特性的主曲线, 两者联合使用后其综合转移因子即为式 (6)。

参考文献:

- [1] 李丽华, 王 利. 时温叠加法确定土工合成材料蠕变折减系数[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 113 - 116. (Li Li-hua, WANG Zhao. Determination of creep reduction factor of geosynthetic by time-temperature superposition[J]. Rock and soil mechanics. 2005, 26(1): 113 - 116. (in Chinese))
- [2] AKINAY Ali E, BROSTOW Witold Long-term service performance of polymeric materials from short-term tests: prediction of the stress shift factor from a minimum of data[J]. Polymer, 2001, 42: 4527 - 4532.
- [3] KOO Hyun-Jin, KIM You-Kyum. Lifetime prediction of geogrids for reinforcement of embankments and slopes[J]. Polymer Testing, 2005, 24: 181 - 188.
- [4] 马德柱, 何平笙, 等. 高聚物的结构与性能[M]. 北京: 科学出版社, 1995. (MA De-zhu, HE Ping-sheng. Structure and performance of high polymer[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese))
- [5] LAI J, BAKKER A. Analysis of the non-linear creep of high density polyethylene[J]. Polymer, 1995, 36(1): 93 - 99.
- [6] BHUVANESH Y C, GUPTA V B. Long term prediction of creep in textile fibres[J]. Polymer, 1994, 35(10): 2226 - 2228.
- [7] LUO W, YANG T, AN Q. Time-temperature-stress equivalence and its application to nonlinear viscoelastic materials[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2001, 14(3): 195 - 199.