

坡积土石混合体蠕变特性的 Burgers 模型*

郭鸿^{1,2,3}, 郭瑞¹, 南亚林^{2,3}, 张鹏², 刘魁^{2,4}

- (1. 陕西理工大学土木工程与建筑学院, 陕西 汉中 723000;
2. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西 西安 710054;
3. 陕西省土体工程技术研究中心, 陕西 西安 710054;
4. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为探明坡积土石混合体的蠕变特性, 利用大型直剪仪对陕西省城固县某边坡的坡积土石混合体进行了剪切蠕变试验, 重点研究了分级加载方式下坡积土石混合体的蠕变特性, 建立了坡积土石混合体的 Burgers 模型并确定了其参数获取方式, 并建议在分级加载条件下获取分别加载蠕变终值的方法。结果表明: 分级加载方式下土石混合体的蠕变规律呈衰减蠕变特性, 且蠕变变形随着垂直应力的减小和剪切应力的增大而增大, 不同垂直应力下的 $t/[\varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)]-t$ 的曲线均呈高度线性, 且拟合的直线方程斜率和剪切应力没有明显的相关性。本文提出的 Burgers 模型能够较好地模拟该地区坡积土石混合体的剪切蠕变特性。

关键词: 坡积土石混合体; 剪切蠕变; Burgers 模型

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2020) 06-0064-06

Burgers model of creep properties of colluvial soil-rock mixture

GUO Hong^{1,2,3}, GUO Rui¹, NAN Yalin^{2,3}, ZHANG Peng², LIU Kui^{2,4}

- (1. School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China;
2. China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710054;
3. Soil Engineering Technology Research Center of Shaanxi, Xi'an 710054, China;
4. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to investigate the creep characteristics of colluvial soil-rock mixture, shear creep tests were performed by using a large-scale direct-shear instrument on a colluvial soil-rock-soil mixture of a slope in Chenggu county, Shaanxi province. The creep characteristics of the colluvial soil-soil-mixture under graded loading were mainly studied to establish the Burgers creep model and determine the parameters through the data fitting. The method of obtaining the final creep value of separate loading under the condition of graded loading is suggested. The results showed that the creep law of soil-rock mixture exhibits a gradual creep behavior under the grading loading, and the creep deformation increases with decreasing vertical and increasing shear stresses. The curves of $t/[\varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)]-t$ under different vertical stresses are all highly linear, and there is no obvious correlation between the slope of the fitted straight line and the shear stress. The Burgers model proposed in this paper can well simulate the shear creep

* 收稿日期: 2020-05-13

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2020SF-430, 2019ZDLSF05-07); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (19JK0174); 陕西理工大学人才启动项目 (SLGQD2017-03)

作者简介: 郭鸿 (1984年生), 男; 研究方向: 颗粒物力学和岩土工程; E-mail: hguo@snut.edu.cn

通信作者: 南亚林 (1970年生), 男; 研究方向: 岩土工程和地质工程; E-mail: nan.yalin@dxy53.com

2 试验结果与分析

以往的研究表明, 如果使用分级加载方式获得蠕变特性曲线, 则需要对蠕变基础数据进行处理, 一般可通过 Boltzmann 线性叠加和陈氏叠加法实现^[13-14]。第一种叠加法的明显缺陷是假设土体为线性流变体, 而陈氏叠加法则充分考虑了上一级荷载产生的非线性效应^[15]。其具体过程可以表述如下: 假设每次分级加载的增量为 $\Delta\sigma$, 在获得其蠕变曲线的基础上, 采用陈氏叠加法后所得荷载 $\sigma_n = \sum_{i=1}^n \sigma_i$ 的分别加载蠕变曲线如图 2 所示。第一次分级荷载施加后, 时间从 $t_0=0$ 到 $t_0=t_1$, 土样在荷载 $\sigma_1=\Delta\sigma$ 下产生蠕变变形; 继续对土样增加荷载 $\Delta\sigma$, 那么实际效果则是产生了虚线与实线之间的附加变形 (虚线区域)。在此附加变形中, 找到以 t_0 为起点的蠕变值和以 t_1 为起点应力增量 $\Delta\sigma$ 所引起的蠕变增量 $\Delta\varepsilon(t)$ 。继续分级加载, 用同样方法处理, 如此便可获得分别加载应力为 $\sigma_n = \sum_{i=1}^n \sigma_i$ 的蠕变曲线, 如图 2(b) 所示。

需要指出的是, 本文中的蠕变变形为剪切变形。利用陈氏叠加法对分级加载蠕变曲线 (图 3

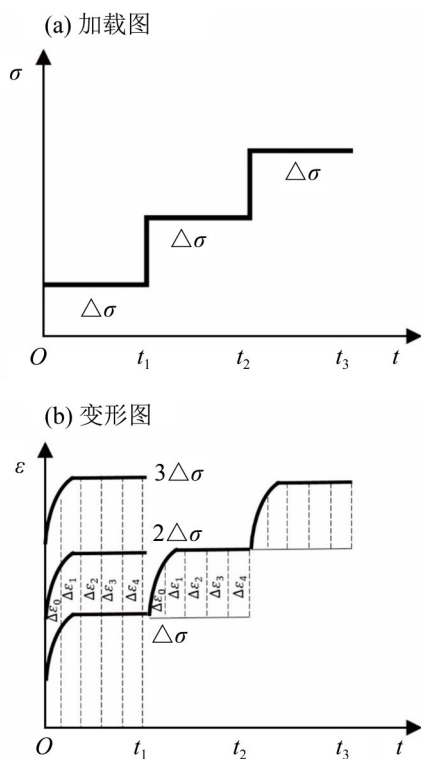


图 2 陈氏法处理蠕变数据示意图^[14]

Fig. 2 Schematic diagram of Chen's method for processing creep data

(a) 进行处理, 得到不同垂直压力下 (100、200 和 300 kPa) 分别加载的蠕变曲线如图 3(b)(c)和(d) 所示。其中切向荷载从 100~400 kPa, 分级增量为 100 kPa。从图可以看出: 分级加载条件下, 蠕变的总体增量随着垂直压力的增大而减小; 陈氏处理法转化后, 相同垂直压力情况下, 蠕变起始量随着剪切应力的增大而增大, 且曲线逐渐变缓直至稳定。另外, 根据笔者以往的研究经验^[1], 经过陈氏叠加法得到的分别加载蠕变曲线和直接进行分别加载试验得到的蠕变曲线有一定差别, 主要表现在前者的变形稳定值略大于后者的变形稳定值。所以就土石混合体工程中的分别加载工况来讲, 本文的研究结果略偏保守。

3 模型分析

3.1 Burgers 蠕变模型

由于土石混合体在恒定应力下, 既有土体部分的蠕变, 又有石块的蠕变, 其蠕变特点符合 Maxwell 模型与 Kelvin 模型串联的情形, 因此本文选择 Burgers 模型, 如图 4 所示。

其蠕变方程为

$$\varepsilon_B(t) = \frac{\sigma_0}{E_m} + \frac{\sigma_0}{\eta_m} t + \frac{\sigma_0}{E_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k}{\eta_k} t\right) \right] \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_B(t)$ 为任意时刻下的蠕变值; σ_0 为轴向偏应力; E_m 和 η_m 分别为 Maxwell 弹性系数和黏性系数; E_k 和 η_k 分别为 Kelvin 弹性系数和黏性系数。

考虑到该土石混合体试样的蠕变呈非线性衰减, 所以有

$$\varepsilon_B(t_\infty) = C(\text{常数}) \Rightarrow \frac{\sigma_0}{\eta_m} t_\infty = 0 \Rightarrow \eta_m \rightarrow \infty \quad (2)$$

则此时

$$\begin{aligned} \varepsilon_B(t) &= \frac{\sigma_0}{E_m} + \frac{\sigma_0}{E_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k}{\eta_k} t\right) \right] \\ &= A_B + B_B \left[1 - \exp(-C_B t) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

对分级加载试验数据经陈氏叠加法处理后, 进一步绘制轴向荷载为 100、200 和 300 kPa 下的 $t/[\varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)]$ 与 t 关系曲线, 见图 5。

由图 5 知, 该土石混合体试样 $t/[\varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)]$ 与 t 基本呈线性关系, 故可表示为:

$$\frac{t}{\varepsilon_E(t) - \varepsilon(t_0)} = B + At \quad (4)$$

式中, $\varepsilon_E(t)$ 为任意时刻下的蠕变值, A 和 B 分别为 $t/[\varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)]$ 与 t 关系曲线的斜率和截距, $\varepsilon(t_0)$

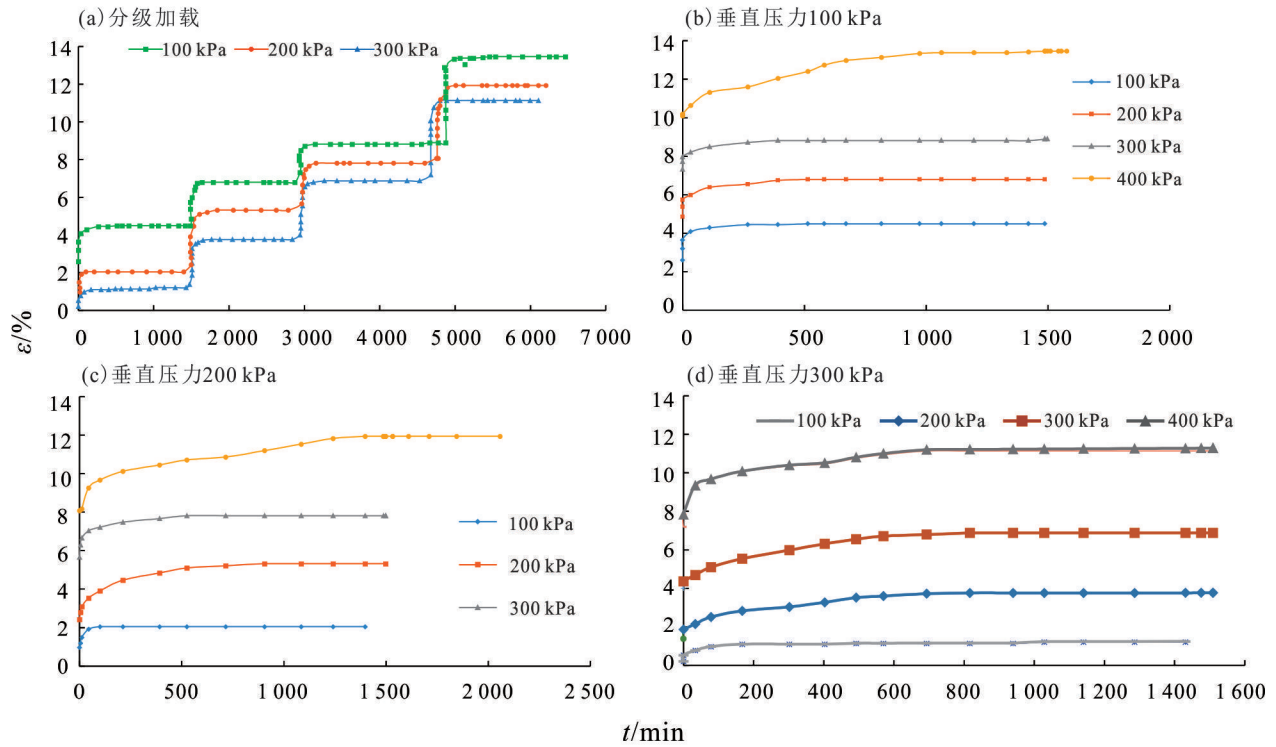


图 3 坡积土石混合体蠕变特性曲线

Fig. 3 The creep characteristic curve of the colluvial soil-rock mixture

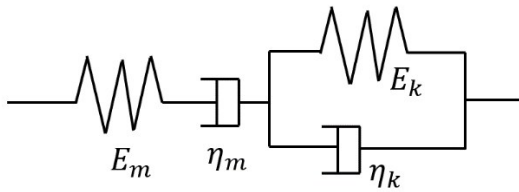


图 4 Burgers 模型

Fig. 4 Burgers model

为蠕变初始时刻的变形量。

由于式 (3) 和式 (4) 均描述了蠕变变形和时间的关系, 故可利用二者的等价关系进行如下推导:

$$\varepsilon_E(t) = \varepsilon_B(t) \quad (5)$$

当 $t \rightarrow 0$ 时,

$$\varepsilon_E(t_0) = \varepsilon(t_0) = \varepsilon_B(t_0) = A_B \quad (6)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,

$$\varepsilon_E(t_\infty) = \frac{1}{A} + \varepsilon(t_0) = \varepsilon_B(t_\infty) = A_B + B_B \quad (7)$$

综合式 (6) 和式 (7) 可得:

$$A_B = \varepsilon(t_0), B_B = \frac{1}{A} \quad (8)$$

将式 (8) 带入式 (3) 中即可得到三参数 Burgers 蠕变模型:

$$\varepsilon_B(t) = \varepsilon(t_0) + \frac{1}{A} [1 - \exp(-C_B t)] \quad (9)$$

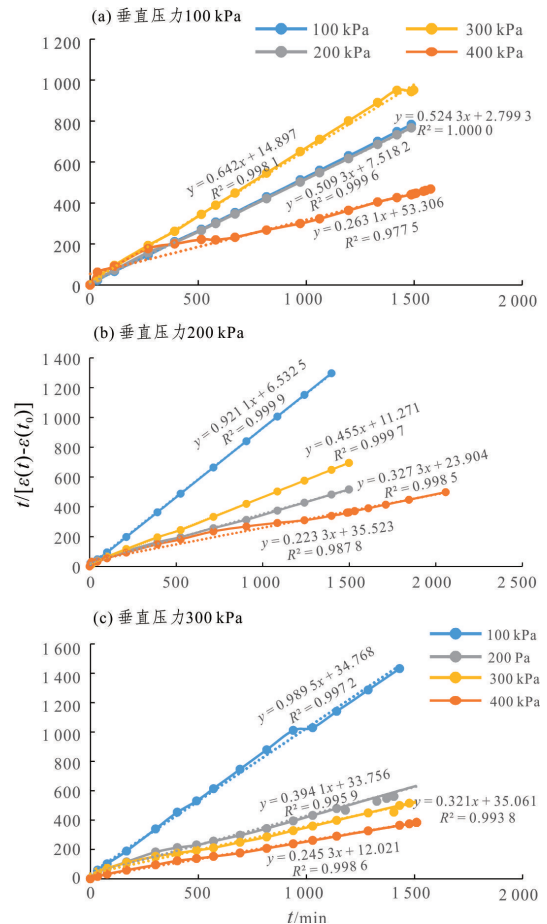


图 5 $t[\varepsilon(t)-\varepsilon(t_0)]-t$ 曲线

Fig. 5 $t[\varepsilon(t)-\varepsilon(t_0)]-t$ curves

式中, A 为 $t/[\varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)]$ 与 t 关系曲线的斜率, $\varepsilon(t_0)$ 为蠕变初始时刻的变形量, C_B 为调整参数。前二者均可通过实测试验数据得到, C_B 可通过试算获取, 本模型中 C_B 为恒值 0.000 01。这和文献 [1] 中的基本思路是一致的, 所不同的只是土石混合体蠕变模型的参数, 这进一步说明了 Burgers 模型的应用范围比较广泛。需要指出的是, 本文所用的土石混合体在蠕变剪切的过程中未发生破碎现象。下一步重点分析坡积风化砂岩的蠕变特征, 并考虑颗粒破碎对蠕变的影响。

将 3 种垂直应力和 4 种剪切应力情况下, 经过陈氏叠加法转化后的蠕变曲线进行 Burgers 模型参数拟合, 如表 1 所示。

表 1 Burgers 模型参数拟合表
Fig.1 Parameter fitting table of the Burgers model

垂直 应力/kPa	剪切 应力/kPa	$\varepsilon(t_0)/\%$	A	C_B
100	100	2.59	0.524 3	0.000 01
	200	4.85	0.509 3	0.000 01
	300	7.31	0.642 0	0.000 01
	400	10.10	0.263 1	0.000 01
200	100	0.97	0.921 1	0.000 01
	200	2.42	0.327 3	0.000 01
	300	5.65	0.455 0	0.000 01
	400	7.81	0.223 3	0.000 01
300	100	0.20	0.394 1	0.000 01
	200	1.37	0.989 5	0.000 01
	300	4.00	0.321 0	0.000 01
	400	7.19	0.245 3	0.000 01

3.2 分级加载情况下蠕变终值的工程确定方法

从研究的角度讲, 由于室内试验条件和研究时长的限制, 针对蠕变变形特征, 国内外基本都采取分级加载方式。然而事实情况是, 一般工程

的荷载, 由于工期之需要, 是一次性完成上部建筑加载的。两者的不同在于蠕变过程: 前者是分级加载, 等每一级蠕变稳定后再行增载使得蠕变再次稳定, 而后者则可以看作是一次大量加载, 在工程的后续运营中蠕变再逐渐达到稳定。所以, 这就需要研究不同加载方式下蠕变终值的关系。

由本文所建 Burgers 蠕变模型知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 蠕变最终变形稳定值为:

$$\varepsilon(t \rightarrow \infty) = 1/A + \varepsilon(t_0) \quad (10)$$

用下标 r 代表分别加载; s 代表分级加载, 并假设 A_r 和 A_s 的函数关系为:

$$A_r = f(A_s) \quad (11)$$

综合式 (10) 和式 (11) 可得由分级加载试验数据推算分别加载状态下蠕变最终变形稳定值的经验转换模型为:

$$\varepsilon_r(t \rightarrow \infty) = 1/f(A_s) + \varepsilon_r(t_0) \quad (12)$$

其中, A_s 可由分级加载试验数据处理得到, $\varepsilon_r(t_0)$ 可由分别加载试验直接得到。

由于本文并未进行分别加载室内试验, 故暂时无法得到 A_r 和 A_s 的函数关系。

4 结 论

本文以陕西城固某滑坡堆积形成的土石混合体为研究对象, 通过剪切蠕变试验重点研究了其蠕变特性, 主要得出以下结论:

1) 总体来看, 坡积土石混合体的蠕变呈衰减规律; 用陈氏处理法将坡积土石混合体的分级加载数据处理后发现, 随着垂直应力的减小和剪切应力的增大, 剪切蠕变呈增加趋势。

2) 不同垂直应力下的 $t/[\varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)]-t$ 的曲线均呈高度线性, 且拟合的直线方程斜率和剪切应力没有明显的相关性。

3) 建立了所研究土石混合体的 Burgers 蠕变模型, 并利用 $t/[\varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)]$ 与 t 的线性关系对模型参数进行了研究, 结果表明模型拟合效果较理想。

参考文献:

[1] 郭鸿, 骆亚生, 王鹏程. 分别、分级加载下压实黄土三轴蠕变特性及模型分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 117-124.
GUO H, LUO Y S, WANG P C. Triaxial creep characteristics and models of remolded loess under separate and graded loading [J]. Journal of Hydroelectric Engi-

neering, 2016, 35(4): 117-124.

[2] 张宏明, 丁秀丽, 张群, 等. 土石混合体微观结构模型随机生成技术研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(7): 124-126+129.

ZHANG H M, DING X L, ZHANG Q, et al. Research on random generating technology of micro structure mod-

- el of soil-rock mixture[J]. *Yellow River*, 2012, 34(7): 124-126+129.
- [3] 董辉,彭搏程,邹畅宇,等. 成层状堆沉积土石混合体的结构量化表征及其应用[J]. *长江科学院院报*, 2019-12-20. DOI:10. 11988/ckyyb. 20191008
DONG H, PENG B C, ZOU C Y, et al. Quantitative structural characterization of the layered deposited and sedimentary soil-rock mixtures and its application[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019-12-20. DOI:10. 11988/ckyyb. 20191008.
- [4] 范登坡. 不同含石量残坡积土蠕变特性研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2019:1-5.
FAN D B. Study on creep characteristics of residual slope soil with different rock contact [D]. *Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power*, 2019:1-5.
- [5] MAHDEVARI S, MAAREFVAND P. An investigation into the effects of block size distribution function on the strength of bimrocks based on large-scale laboratory tests [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9 (7) : 1-9.
- [6] 王睿. 渗流条件下花岗岩蠕变及本构模型研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2018:7-9.
WANG R. Study on creep and constitutive model of granite under condition of seepage[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2018;7-9.
- [7] 郭兴文,杜建莉,赵骞,等. 胶凝砂砾石料蠕变试验及大坝长期变形预测[J]. *人民黄河*, 2019, 41 (9) : 149-154.
GUO X W, DU J L, ZHAO Q, et al. Creep test of CSG and long-term deformation prediction of CSG Dams [J]. *Yellow River*, 2019, 41(9): 149-154.
- [8] 刘新荣,黄明,祝云华,等. 土石混合体填筑路堤中的非线性蠕变模型探析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(8) : 2453-2458.
LIU X R, HUANG M, ZHU Y H, et al. Study of nonlinear creep model of earth-rock aggregate embankment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010,31(8):2453-2458.
- [9] WANG S, WANG J, WU W, et al. Creep properties of elastic soil in a reactivated slow-moving landslide in the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. *Engineering Geology*, 2020, 267: 105493. doi. org/10. 1016/j. eng-geo. 2020. 105493
- [10] 张敏超,刘新荣,王鹏,等. 不同含石量下泥岩土石混合体剪切特性及细观破坏机制[J]. *土木与环境工程学报*, 2019, 41(6) : 17-26.
ZHANG M C, LIU X R, WANG P, et al. Shear properties and failure meso-mechanism of soil-rock mixture composed of mudstone under different rock block proportions [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(6) : 17-26.
- [11] MEDLEY E. The engineering characterization of melanges and similar rock-in-matrix rocks (bimrocks) [D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1994.
- [12] 徐文杰,胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(4) : 50-56+70.
XU W J, HU R L. Conception, classification and significations of soil-rock mixture [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(4) : 50-56+70.
- [13] SUN Y Z, GU Z Y, WANG J C, et al. Research of method for solving relaxation modulus based on three-point bending creep test [J]. *Materials*, 2019, 12(12) : 2021. DOI: 10. 3390/ma12122021.
- [14] 邱慧阳. 土石混合体蠕变特性的试验研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2018:28-30.
QIU H Y. Experimental study on creep characteristics of soil-rock mixtures [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018:28-30.
- [15] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京:地质出版社, 1994:139-141.

(责任编辑 秦社彩)