

高应力条件下黄土三轴蠕变试验及经验模型

张昊¹, 顾强康¹, 裴元新¹, 王乐凡¹, 刘少博¹, 殷帛成²

(1. 空军工程大学机场建筑工程系,西安,710038;2. 93808部队,兰州,730109)

摘要 为研究高填方地基黄土在高应力条件下的蠕变特性及其随深度的变化规律,在不同围压下针对陕西延安机场高填方黄土进行三轴固结不排水蠕变试验。采用“陈氏法”对试验数据分析处理,获得分别加载下各围压的蠕变曲线和应力-应变等时曲线。试验发现黄土的蠕变特性在高应力与低应力水平下有显著不同:其应力-应变关系在低应力条件下近似呈线性特性,高应力条件下表现出明显的非线性特性。以围压 600 kPa 为例,由指数函数描述应力-应变关系,双曲线函数描述应变-时间关系,建立了适合延安机场并可以反映高应力条件下黄土蠕变特性的经验模型。将 Mesri 模型、Singh-Mitchell 模型与经验模型比较,发现该模型与试验数据拟合度高、形式简洁、参数少且易获取,能更好地对延安机场黄土的蠕变特性进行反映和预测。

关键词 黄土;高应力;三轴蠕变试验;陈氏法;经验蠕变模型

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.05.005

中图分类号 V35;TU43 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)05-0020-04

Tri-axial Creep Test on Loess and A Study of Empirical Models under Conditions of High Stress

ZHANG Hao¹, GU Qiangkang¹, PEI Yuanxin¹, WANG Lefan¹, LIU Shaobo¹, YIN BoCheng²

(1. Department of Airport Architectural Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 93808, Lanzhou 730109, China)

Abstract: To investigate the creep properties of loess in high-fill foundation under conditions of high stress and different depth, the CU tri-axial creep tests of loess at Yan'an airport are carried out under conditions of different confining pressure. The creep curves of multi-step constant load and the equal-time stress-strain curves are obtained by using "Chen method". The results indicate that the creep properties of the loess are obviously influenced by stress level. The stress-strain presents linear properties under conditions of lower stress, and shows nonlinear creep properties under conditions of higher stress. Taking the confining pressure 600 kPa for example, an empirical creep model is proposed in which the stress-strain is described by exponential function and the strain-time is described by hyperbolic function. The result shows that the model proposed and the empirical data are high in fitting degree, simple in formality, few in parameters and easy in achievement, can further reflect and predict the creep properties of the loess at Yan'an airport engineering compared with Singh-Mitchell and Mesri models.

Key words: loess; high stress; tri-axial creep test; Chen method; empirical creep model

收稿日期:2014-12-11

基金项目:陕西省青年科技新星项目资助(KJXX-81)

作者简介:张昊(1991-),男,江苏南京人,硕士生,主要从事地基处理与边坡稳定研究.E-mail:fourapril@sina.cn

引用格式:张昊,顾强康,裴元新,等.高应力条件下黄土三轴蠕变试验及经验模型研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(5):20-23. ZHANG Hao, GU Qiangkang, PEI Yuanxin, et al. Tri-axial Creep Test on Loess and A Study of Empirical Models under Conditions of High Stress[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(5): 20-23.

黄土地区高填土地基长期沉降与黄土的蠕变特性密切相关。文献[1~4]主要针对低围压、低应力条件下的黄土蠕变特性进行了研究,围压和偏应力水平对土的蠕变特性有明显影响。目前,对高围压、高应力条件下黄土蠕变特性的研究较少。陕西延安机场工程填方高度超过 120 m,是目前国内湿陷性黄土地区填土高度最高的机场^[5],其填土体底部黄土竖向应力可达 2 MPa,围压可达 1 MPa。因而,开展黄土在高围压、高应力条件下的蠕变特性研究,不仅可以完善黄土蠕变理论,对预测和控制高填土地基工后沉降变形也具有重要的理论和实践意义。

1 三轴固结不排水蠕变试验

1.1 试验设备及试样

试验采用自主设计并由西安市亚星公司制造生产的全自动土工应力三轴松弛蠕变试验仪。试验仪利用气泵提供竖向应力;水压泵提供围压;通过数据采集系统对轴向变形进行自动采集。试验时保持室内温度为 25 °C ± 1 °C。

试样取土深度为 3.0 m,属 Q₂黄土。天然含水率 ω 为 11.5%;比重 G_s 为 2.7;界限含水率 ω_L 为 28%; ω_p 为 20.4%;塑性指数 I_p 为 7.6;最优含水率 ω_{op} 为 13.0%;最大干密度 ρ_{dmax} 为 1.88 g/cm³。试样尺寸为 $\Phi = 39.1$ mm, $H = 80$ mm。本文研究延安机场的长期沉降问题,必须保证试样与现场的相似性^[6]。依照工程实际,试样由黄土碾碎、过筛、烘干后,按最优含水率 13.0%、压实度 0.95 分层击实而成。

1.2 试验方案

采用分级加载方式对试样进行固结不排水蠕变试验。高填土地基中,随着填筑高度的增加,土体应力水平不断提高,围压也不断升高。试验设置 5 个水平的围压,包括 100 kPa、300 kPa、600 kPa、900 kPa 和 1 200 kPa。为研究试样在不同应力比下的蠕变特性,竖向应力水平按照固定的应力比逐级增加。因为粘性土的侧压力系数一般取 0.5~0.7,所以试验的应力比按 0.8、0.7、0.6、0.5、0.4 这 5 个等级选取。根据文献[2~3]等的经验,黄土试样在施加荷载一天后即进入稳定蠕变阶段,之后的蠕变趋势可预测出来,故每一级的作用时间为 24 h。

充分考虑黄土蠕变的非线性特点及前一等级荷载对后一级荷载产生的后效影响,采用“陈氏法”分析处理分级加载下的蠕变全过程曲线。

2 试验结果及分析

2.1 蠕变曲线及应力-应变等时曲线

以围压 600 kPa 试验为例,对蠕变特性进行分析。600 kPa 下,5 个水平的应力比对应的偏应力 p 分别为 150 kPa、257 kPa、400 kPa、600 kPa 和 900 kPa。将试验数据按应变-时间关系整理,得到分级加载下的蠕变全过程曲线。将全过程曲线按“陈氏法”处理,得到分别加载条件下的蠕变曲线,见图 1。

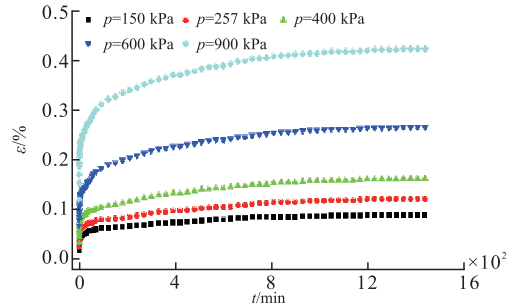


图 1 600 kPa 围压下蠕变曲线

Fig.1 Creep curves under confining pressure of 600 kPa

可以看出,不同偏应力下黄土的蠕变特性有所不同。偏应力越大,土样瞬时变形越大,结构调整时间越长,土样达到稳定蠕变阶段的时间越长;试样在不同曲线中的轴向应变量最终都趋于稳定值,但最终应变率随偏应力的增大而增大。

将蠕变曲线按应力-应变关系整理,可得应力-应变等时曲线^[7],见图 2。

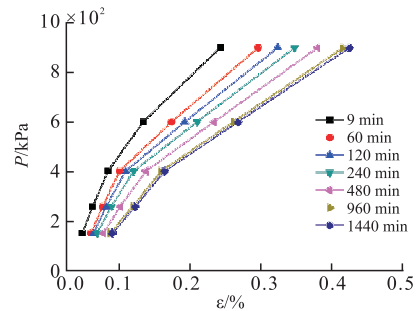


图 2 600 kPa 围压下应力-应变等时曲线

Fig.2 Stress-strain isochronal curves under confining pressure of 600 kPa

图中各时刻下的应力-应变曲线均不是直线,说明黄土蠕变在 600 kPa 围压下具有明显的非线性;随着偏应力的增大,曲线斜率逐渐减小,非线性特征越明显。曲线在偏应力约 400 kPa 处出现拐点,文献[8]认为此点即应力屈服点,当土样所受应力低于屈服应力时会发生粘弹性变形,所受应力超过屈服应力时会发生粘塑性变形。

2.2 蠕变模型建立

结合最小二乘法对试验的蠕变曲线和应力-应变曲线进行拟合分析,确定采用指数函数描述应力-应变关系,双曲线函数描述应变-时间关系。则可建立蠕变方程表达式为:

$$\epsilon = Ae^{\alpha(\sigma_1-\sigma_3)}t/T_1t + T_2 \tag{1}$$

令 $B = A/T_1$, $T = T_2/T_1$, 则式(1)为:

$$\epsilon = Be^{\alpha(\sigma_1-\sigma_3)}t/t + T \tag{2}$$

式(2)即为自定义的经验蠕变方程,该方程需要确定的参数有 3 个,即 B, α 和 T 。

1) 确定参数 T : 取 $t \rightarrow \infty$, 则 $\epsilon \rightarrow \epsilon_\infty$

$$\epsilon_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} (Be^{\alpha(\sigma_1-\sigma_3)}t/t + T) = Be^{\alpha(\sigma_1-\sigma_3)} \tag{3}$$

代入式(2)得:

$$t/\epsilon = t/\epsilon_\infty + T/\epsilon_\infty \tag{4}$$

令 $Y = t/\epsilon$, $X = t$, $a = 1/\epsilon_\infty$, $b = T/\epsilon_\infty$, 则 $t/\epsilon - t$ 关系见图 3:

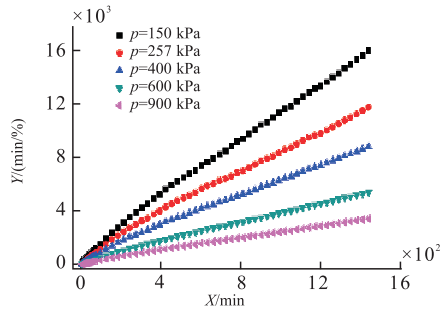


图 3 600 kPa 围压下 Y - X 曲线

Fig.3 Y - X curves under confining pressure of 600 kPa

将图中数据拟合,分别得到 5 级荷载下对应的 a, b 值,继而得到 T 的平均值为 31.3 min。

2) 确定参数 B 和 α : 式(3)两端取对数,得:

$$\ln \epsilon_\infty = \ln B + \alpha(\sigma_1 - \sigma_3) \tag{5}$$

式中: $\ln B$ 和 α 分别是截距和斜率。根据上文计算结果绘制图 4 见关系曲线。

由拟合直线的截距与斜率,可得 $\alpha = 0.002 07$, $\ln B = -2.650 56$, 即 $B = 0.070 612$ 。故所建立的蠕变模型为:

$$\epsilon = 0.070 612e^{0.002 07(\sigma_1-600)}t/t + 31.3 \tag{6}$$

对式(6)的计算结果与试验数据,结果见图 5。

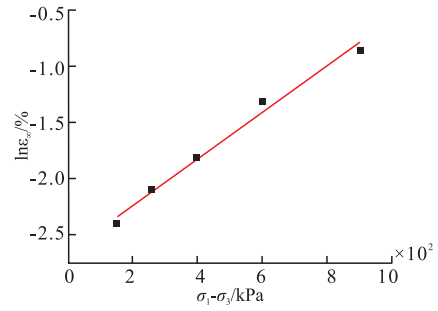


图 4 600 kPa 围压下 $\ln \epsilon_\infty - (\sigma_1 - \sigma_3)$ 关系曲线

Fig.4 Relations between $\ln \epsilon_\infty$ and $\sigma_1 - \sigma_3$ under confining pressure of 600 kPa

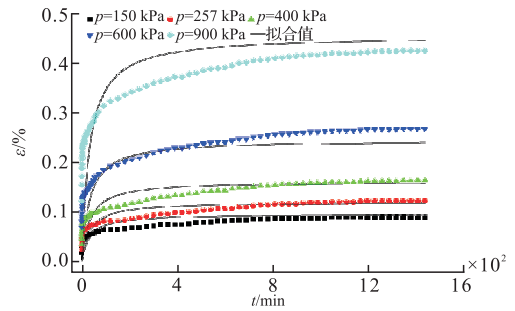


图 5 600 kPa 围压下计算结果与试验数据对比

Fig.5 Comparison between test data and calculated results under confining pressure of 600 kPa

由图 5 可知,理论曲线与试验数据趋势一致,二者吻合较好,说明该模型在反映高应力水平下的黄土蠕变特性方面具有较好的效果。

2.3 模型验证

采用 600 kPa 围压下的试验数据,将该模型与 Singh-Mitchell 模型和 Mesri 模型比较,见表 1。2 组偏应力条件下, Mesri 模型均与试验数据偏差较大,表明 Mesri 模型在描述延安机场高填方黄土蠕变特性方面存在局限性; Singh-Mitchell 模型在低应力水平下与试验数据吻合较好,但在高应力水平下尤其是蠕变后期阶段,拟合效果不甚理想。本文建立的蠕变模型,在数据吻合性以及曲线趋势上均具有较好效果,尤其在蠕变稳定阶段,两者吻合较好,这有利于今后研究延安机场长期沉降。

表 1 不同经验模型比较

Tab.1 Comparison between different empirical models

偏应力 /kPa	时间 /min	试验值	Singh-Mitchell	相对误差/%	Mesri	相对误差/%	New	相对误差/%
257	60	0.076 25	0.079 98	4.891 8	0.092 16	20.86 56	0.078 99	3.593 4
	720	0.112 5	0.109 97	2.248 9	0.126 72	12.640 0	0.115 2	2.400 0
	1 440	0.122 5	0.120 19	1.885 7	0.138 49	13.053 1	0.1176 5	3.959 0
900	60	0.296 25	0.357 8	20.776 4	0.250 2	15.544 3	0.298 99	0. 924 9
	720	0.405	0.491 97	21.47 41	0.344 02	15.056 8	0.436	7.654 3
	1 440	0.425	0.537 67	26.510 6	0.375 98	11.534 1	0.4452 8	4.771 8

2.4 围压对蠕变特性的影响

由图 6 可以看出,相同应力比下,围压越大,土样瞬时变形越大,结构调整时间越长,土样达到稳定蠕变阶段的时间越长,最终应变率越大。

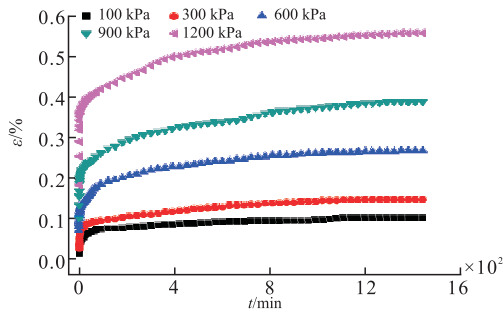


图 6 应力比 0.5 时不同围压下的蠕变曲线

Fig.6 Creep curves under different confining pressure when $k = 0.5$

事实上,将应力比 $k = \sigma_1 / \sigma_3$ 带入式(2)得:

$$\epsilon = Be^{a(\frac{1}{k}-1)\sigma_3} t / t + T \tag{9}$$

即:应力比不变时,轴向应变随围压呈指数变化。

由图 7 可以看出,低围压条件下,应力-应变曲线近似呈线性关系且各曲线斜率基本相等,说明低围压下黄土蠕变的非线性特征不明显,见图 7(a);随着围压增大,黄土蠕变呈现越来越明显的非线性特征,见图 7(b)~7(c)。所以在低围压条件下,黄土的蠕变试验数据用 Boltzmann 线性叠加法近似处理误差不大,而高围压下应采用考虑材料非线性特性的“陈氏法”处理数据。

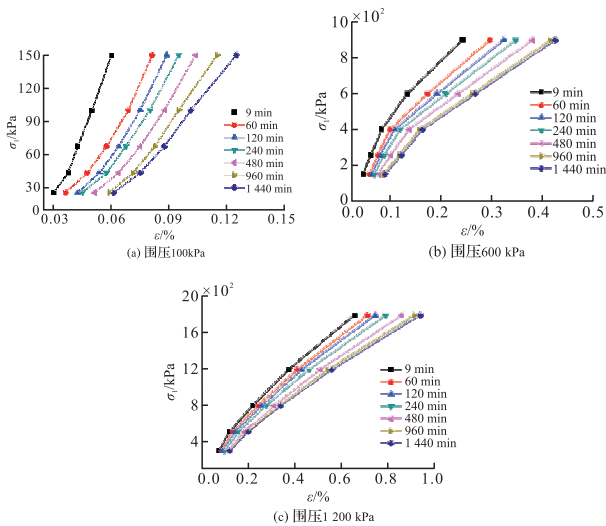


图 7 不同围压下应力-变等时曲线

Fig.7 Stress-strain isochronal curves under different confining pressure

3 结语

本文在不同围压下通过自主设计的全自动应力

三轴松弛蠕变仪进行了三轴不排水蠕变试验,研究了高围压、高应力条件下黄土的蠕变特性。充分考虑黄土蠕变的非线性特点及分级荷载的后效影响,建立了适合延安机场并可以反映高应力条件下黄土蠕变特性的经验蠕变模型,可以较好地描述高围压、高应力条件下黄土的蠕变特性。实验证明,随着围压增大,黄土蠕变呈现越来越明显的非线性特征。下一步将就如何以围压作为参数引入黄土蠕变的定量研究与建立更精确的蠕变模型进行重点研究。

参考文献(References):

[1] Ajaz A, Parry R.H.G. Stress-Strain Behavior of Loess in Uniaxial Compression[J]. Geotechnique, 1975, 25(3): 495-512.

[2] 王松鹤. 黄土蠕变特性试验研究[D].杨陵:西北农林科技大学, 2010.
WANG Songhe.Study on Creep Characteristics of Loess[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2010.(in Chinese)

[3] 李广冬. 黄土的三轴蠕变特性试验研究[D].杨陵:西北农林科技大学, 2011.
LI Guangdong.Study on Triaxial Creep Characteristics of Loess [D].Yangling:Northwest A&F University, 2011.(in Chinese)

[4] CHEN Xiao-bin. Effects of Stress Conditions on Rheological Properties of Granular Soil in Large Triaxial Rheology Laboratory Tests[J]. J. Cent. South Univ. Technol, 2008, 15(1): 397-401.

[5] 屈波,顾强康. 地震荷载作用下加筋高边坡的稳定性分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(2):81-85.
QU Bo,GU Qiangkang, et al. Analysis of Stability on Reinforced Soil Slope Under the Action of Earthquake Load[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition,2014, 15(2):81-85.(in Chinese)

[6] 徐明,宋二祥. 高填方长期工后沉降研究的综述[J]. 清华大学学报, 2009, 49(6): 786-789.
XU Ming, SONG Erxiang. Review of Long-Term Settling of High Fills[J]. Journal of Tsinghua University, 2009, 49(6): 786-789.(in Chinese)

[7] Kavazanjian Jr E, Mitchell J K. Time- Dependent Deformation Behavior of Clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1980, 106(GT6):611 - 631.

[8] 王元战,王婷婷,王军. 滨海软土非线性流变模型及其工程应用研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2679-2685.
WANG Yuanzhan, WANG Tingting, WANG Jun. A Nonlinear Rheological Model of Softclay and its Application to Tianjin Littoral Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9):2679 - 2685.(in Chinese)

(编辑:徐敏)