

网络出版时间:2016-10-09 10:08 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.11.030
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20161009.1008.060.html

平面应变状态下黄土蠕变研究

郭 鸿^{1,2}, 骆亚生², 胡连信²

(1 陕西理工大学 土木工程与建筑学院, 陕西 汉中 723000;

2 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】研究平面应变状态下岩土材料长期的沉降变形规律。【方法】采用改造的平面蠕变仪对重塑黄土进行一系列固结平面蠕变试验,分析试样在不同含水率、固结压力、剪应力下的变化特性,并利用模型对变化规律进行拟合。【结果】试样在30%含水率、50 kPa固结压力、300 kPa剪应力下,轴向形变量达到最大值14.54%,而且剪应力大小对含水率较高和固结压力较低的土体蠕变效应敏感性较强。数据分析表明,Singh-Mitchell和Mesri等经典蠕变模型对试验规律的描述精度较差,而建立的经验模型不仅适合黄土平面蠕变变化规律分析,而且具有参数少且容易获得等优点。【结论】利用所建立的经验模型可以模拟黄土平面应变状态下的蠕变规律。

【关键词】 黄土;平面蠕变;沉降变形;经验模型

【中图分类号】 TU432

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)11-0209-06

Loess creep in plane strain conditions

GUO Hong^{1,2}, LUO Yasheng², HU Lianxin²

(1 School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi Sci-Tech University, Hanzhong, Shaanxi 723000, China;

2 Institute of Water Resources and Hydropower Research, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The durable settlement deformation of geotechnical materials under plane strain state was investigated. 【Method】A series of consolidated plane creep tests were conducted by the reformed plane creep meter to remolded loess, and the change of loess under different water contents, confining pressures and shearing stresses were analyzed. Models were also used to simulate the variations. 【Result】The axial deformation reached the largest value of 14.54% when the water content, confining pressure and shearing stress were 30%, 50 kPa and 300 kPa, respectively. The sensitivity of creep characteristics with high water content and low confining pressure was more significant in response to shearing stress. The simulation precision by Singh-Mitchell model and Mesri model was poor, while the established empirical model could well simulate the deformation plane creep with less and easy obtained parameters. 【Conclusion】The established model can be used to simulate loess creep under plane strain state.

Key words: loess; plane creep; settlement deformation; empirical model

黄土沉降问题一直是困扰西北地区建筑构造发展的关键问题,黄土由于其特殊的湿陷性和水敏感性给黄土区域的土建工程带来了诸多影响。实际工程中,因黄土地区地下水位普遍偏低,土体常处于非

饱和状态,而非饱和黄土的典型大孔隙结构、高可溶性盐类含量以及湿陷性^[1]更给非饱和黄土的蠕变沉降研究带来了困难。

对于长度方向断面形状不变的实际工程,如机

场跑道、路堤河堤、地下隧洞、挡土墙等,其实际受力可近似为平面应变状态,对其长期的蠕变沉降问题,采用平面应变试验比三轴蠕变试验更能恰当地描述其蠕变规律。近年来,国内外一些学者对黄土的蠕变规律进行了大量研究^[2-16],但大多采用三轴蠕变试验手段进行研究,试验所得数据虽能反映土体蠕变规律,但却不能准确描述上述工程的实际变形问题。鉴于此,本研究拟利用改造的平面蠕变仪,对重塑黄土的平面蠕变问题展开相关固结蠕变试验,考虑不同含水率(w)、固结压力(σ_3)和剪应力(σ)水平

下的蠕变情况,并在前人模型的基础上建立平面蠕变经验模型,以期为实际工程的设计与施工提供理论依据和参考。

1 材料与方法

以陕西泾阳县太平镇某砖厂土样为研究对象,取土深度为 3.0~4.0 m,孔隙比为 1.14,天然含水率为 16.2%,天然干密度为 1.28 g/cm³,属 Q₃ 黄土。土样基本物理力学指标见表 1,其中黏聚力和内摩擦角由固结不排水剪切试验测得。

表 1 供试黄土的基本物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of loess

相对体 积质量 Relative volume quality	液限 (w_L)/% Water limit	塑限 (w_p)/% Plastic limit	塑性指数 (I_p) Plasticity index	液性指数 (I_L) Liquid index	按塑性 图分类 Classification by plasticity chart	颗粒组成/% Particle composition			黏聚力 (c)/kPa Cohesion force	内摩擦角 (φ)/(°) Angle of internal friction
						>0.075	≤0.075	<0.005		
						mm	~ ≥0.005 mm	mm		
2.74	32.7	16.5	16.2	-0.02	CL	0.9	69.9	29.2	31.6	19.29

为研究平面应变工程中的长期蠕变沉降问题,可以利用改造的平面蠕变仪来模拟实际工程中的蠕变沉降,分析其变形规律。采用文献[17]的方法,先将日本谷藤机械工业株式会社生产的 TS-525 式真三轴仪改造成平面应变仪,再将平面应变压力室移至自制的铁架上,构成平面蠕变仪。其中,将原先柔性加压的 2 个作用面(88.9 mm×88.9 mm)加刚性约束,使该面应变为 0,模拟土体实际受到的侧限条件,并将这个方向定为中主应力 σ_2 方向;2 小侧面(88.9 mm×35.56 mm)由侧板上的气压(空压机提供)加压,模拟土体在长期蠕变沉降过程中受到的侧向压力,并将这个方向定为小主应力 σ_3 方向;在轴

向方向上,通过铁架由砝码提供轴向压力,模拟实际工程中的上覆荷载,并将这个方向定为大主应力 σ_1 方向。在小主应力 σ_3 方向和大主应力 σ_1 方向分别采用自动采集系统和高精度百分表量测其变形大小,所有加压砝码和百分表均经过国家计量认证。图 1 为试样尺寸、压力室及试验装置,其中试样表面 a、b、c 分别对应刚性约束面(σ_2 方向)、侧压面(σ_3 方向)和轴压面(σ_1 方向)。经前期试验^[17-18],改造的压力室能较好适用平面应变的相关试验。在整个蠕变试验过程中, σ_1 和 σ_3 方向均有形变,而 σ_2 方向形变为 0,即利用该仪器作平面蠕变试验时,试样所处状态为平面应变状态。

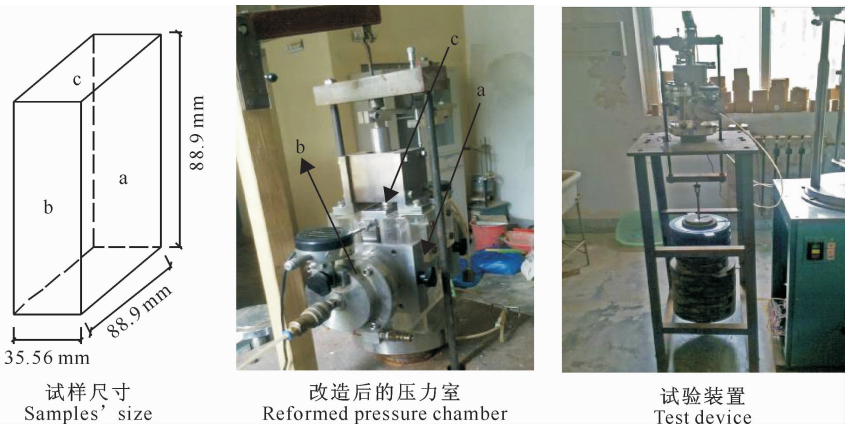


图 1 试样尺寸、平面应变仪压力室及试验装置

Fig. 1 Sample dimension, chamber of plane-strain apparatus and test device

试验采用非饱和重塑黄土样,由所取地区黄土 风干、碾碎、过筛后,控制压实度为 90%压制而成。

试验过程中,试样干密度控制在 1.53 g/cm^3 ,含水率控制在 10% 、 20% 和 30% ,在每种含水率下又分别取 3 个试样进行 $50,100$ 和 150 kPa 3 个不同固结压力的固结处理。固结过程中,保证 $\sigma_1=\sigma_3$ 。利用分级加载方式进行轴向加载,荷载(即剪应力 $\sigma=\sigma_1-\sigma_3$)分别为 $50,100,150,200,250$ 和 300 kPa ,其中第一级荷载在固结完成后开始加载,每级加载后待试样变形稳定再作下一级加载,变形稳定以 4 h 变形小于 0.01 mm 为标准。试验过程中可进行排水。

2 结果与分析

因轴向形变量明显大于侧向形变量,因此本研究着重考虑轴向形变规律。本次蠕变试验用分级加载方式,采用 Boltzmann 叠加原理对所测数据进行处理得到应变(ϵ)-时间(t)关系曲线,以 $\sigma=50,100,200,300\text{ kPa}$ 为例,得到不同含水率(w)及不同固结压力(σ_3)黄土试样的应变随时间的蠕变曲线如图 2 所示。

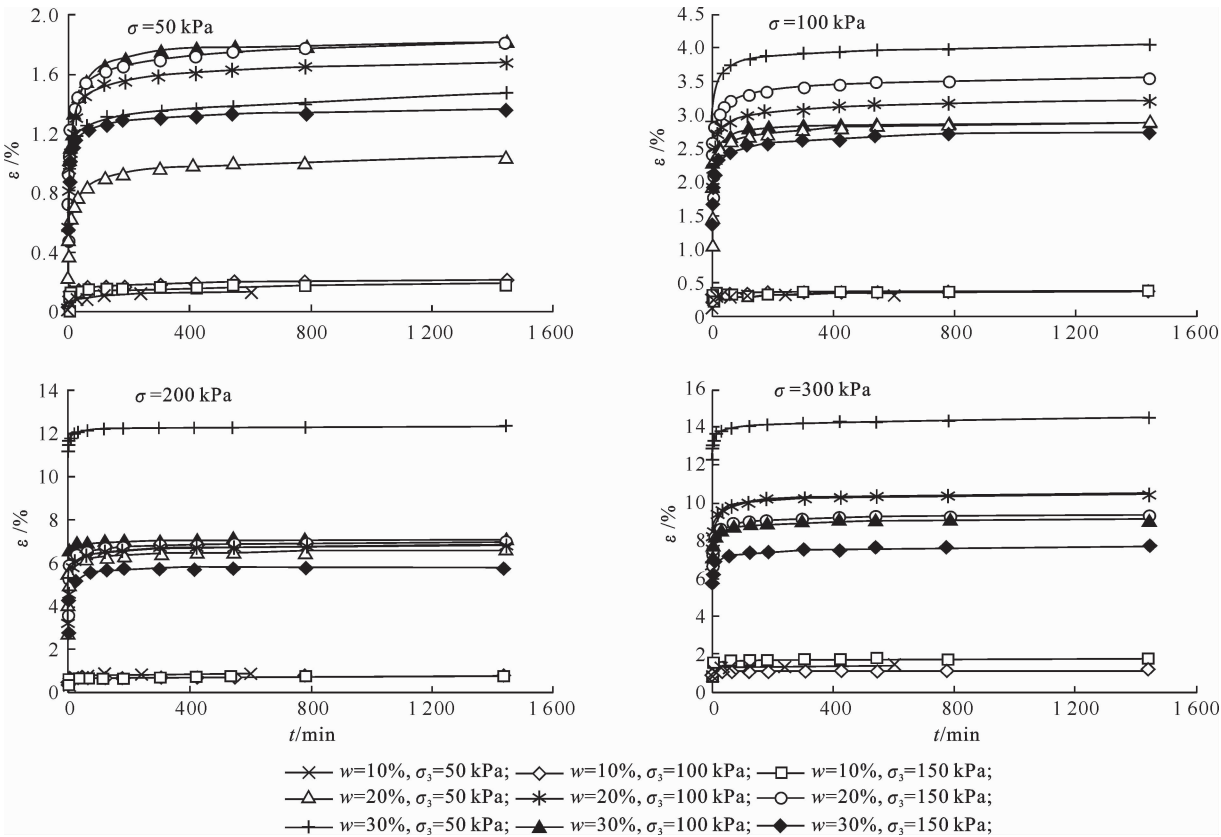


图 2 不同剪应力下应变(ϵ)-时间(t)关系曲线

Fig. 2 Strain-stress and time relationship under different σ

由图 2 可以看出:在试验所处的剪应力水平中,低含水率条件下固结压力大小对试样蠕变性能影响不大,而高含水率条件下固结压力大小对试样蠕变性能有明显影响。在剪应力增大的过程中,部分高含水率试样的应变-时间曲线发生变化,表现为固结压力大小对蠕变的影响作用降低,说明剪应力值的大小对较高含水率和较低固结压力土体的蠕变效应的敏感性较强。

从双电层理论的角度^[11]分析可知,试样含水率的高低对应试样颗粒扩散膜的厚度。含水率高,则试样内部自由水丰富,扩散膜厚度大,土样颗粒之间的静电吸引力相应较小,所以在外界荷载的作用下

颗粒之间的作用力容易被破坏而发生错移等现象,蠕变效应比较明显。先期固结压力大小直接关系到试样蠕变初始时刻的密实度,当固结压力较大时,土样密实度大,空隙率小,含自由水量少,则扩散膜厚度小,土体颗粒之间静电作用大,从而不易在外在荷载的作用下发生错移破坏等现象。在高含水率的条件下,固结压力大小直接影响到土样内部排水的情况,表现为在高含水率时,固结压力对蠕变有明显影响。在后期剪应力较大时,对试样的排水效果愈发明显,表现为对含水条件和固结压力大小的敏感程度相应降低。

3 经验蠕变模型的建立

3.1 常见经验蠕变模型

蠕变模型的经典经验模型中,典型的有 Singh-Mitchell 模型和 Mesri 模型,在后期也相继涌现了不少针对性较强的经验模型。这些模型均通过岩土材料的三轴排水和不排水蠕变试验得到试验数据,在数据的基础上分析提出模型公式。

Singh 和 Mitchell^[19]在单级压应力条件下排水与不排水三轴压缩试验的基础上,分别采用指数关系、幂次关系很好地描述了应力-应变关系和应变-时间关系,模型公式为:

$$\epsilon(t)=\epsilon_0+\frac{A}{1-m}e^{\alpha D}\left(\frac{t}{t_1}\right)^{1-m} \quad (1)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为蠕变过程中的土体应变,%; ϵ_0 为每级荷载初始时刻应变,%; A 、 m 、 α 为该蠕变模型的 3 个参数,其中 $m \neq 1$; e 为自然常数; $\bar{D}$ 为剪应力水平; t 为蠕变时间,min; t_1 为单位时间,min。

Mesri 等^[20]在 Kondner 双曲线模型的基础上,通过对 Singh-Mitchell 模型的改进,提出了采用双曲线函数和幂函数模拟应力-应变关系和应变-时间关系,模型公式为:

$$\epsilon(t)=\frac{2}{(E_u/S_u)_1} \cdot \frac{\bar{D}}{1-(R_f)_1 \bar{D}}\left(\frac{t}{t_1}\right)^{\lambda} \quad (2)$$

式中: E_u 为初始不排水剪切模量,MPa; S_u 为不排水剪切强度,kPa; R_f 为破坏比, $R_f=(\sigma_1-\sigma_3)_f/(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$,其中 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 为实际破坏应力差, $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ 为最大应力差; λ 为模型参数。

文献[6]在分析试验结果的基础上,采用幂函数描述应力-应变曲线,用双曲线描述应变-时间关系

曲线具有较高的精度,由此建立复杂应力下黄土的三轴蠕变经验模型,其公式为:

$$\epsilon(t)=a\bar{D}^n\left(1+\frac{t}{t_1}\right)/\left(1+b\frac{t}{t_1}\right) \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 n 为该模型参数。

3.2 平面蠕变模型的建立

根据上述几种模型公式可以看出,采用幂函数模拟应变-时间关系效果较好。综合上述学者对应力-应变关系采用的不同函数关系,可采用下式来描述该平面蠕变特性,即:

$$\epsilon=f(\sigma)t^{\lambda} \quad (4)$$

式中: ϵ 为蠕变过程中任意时刻 t 时的轴向形变量,%; $f(\sigma)$ 为剪应力 σ 的函数; σ 为剪应力,kPa; λ 为模型参数。

式(4)变换可得:

$$\ln \frac{\epsilon}{t}=\ln f(\sigma)+(\lambda-1) \ln t \quad (5)$$

取本试验 $\sigma=50,100,200,300$ kPa 的平面蠕变数据,绘制 $w=10\%$ 、 $\sigma_3=150$ kPa 时的 $\ln (\epsilon/t)$ 与 $\ln t$ 曲线及 $w=20\%$ 、 $\sigma_3=100$ kPa 时的 $\ln (\epsilon/t)$ 与 $\ln t$ 、 $\ln f(\sigma)$ 与 σ 关系曲线如图 3 和图 4 所示。图 3 和图 4 显示, $\ln \frac{\epsilon}{t}$ 与 $\ln t$ 呈良好的线性关系, $\ln f(\sigma)$ 与剪应力 σ 有较好的对数关系,取为:

$$\ln f(\sigma)=A \ln \sigma+B \quad (6)$$

式中: A 、 B 为模型参数。

整理得适合本试验的蠕变模型为:

$$\epsilon(\sigma, t)=\sigma^A e^{B t^{\lambda}} \quad (7)$$

式中: $\epsilon(\sigma, t)$ 为某一剪应力值 σ 下任意时刻 t 的应变值。

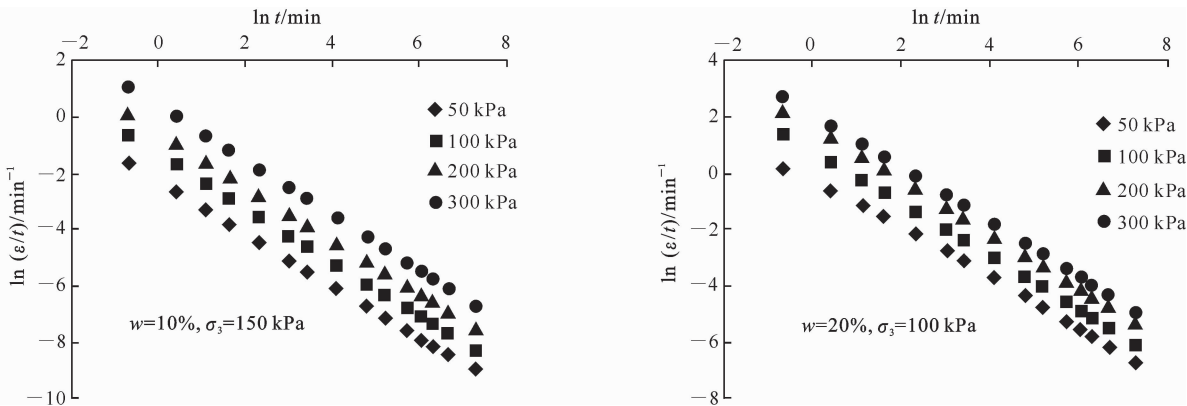


图 3 不同剪应力条件下 $\ln (\epsilon/t)$ 与 $\ln t$ 的关系曲线

Fig. 3 Relationship between $\ln (\epsilon/t)$ and $\ln t$ under different σ

由公式(5)和公式(6)可知,当时间 $t=1$ min 时,有:

$$\ln \epsilon_{t=1} = A \ln \sigma + B。$$
 (8)

容易得出模型参数 A 、 B 为单位时刻应变对数与应力对数关系曲线的斜率值和截距值,进而可得 $\ln \epsilon_t$

与 $\ln \sigma$ 的关系曲线如图 5 所示,表 2 为全部试验模型参数的计算结果。

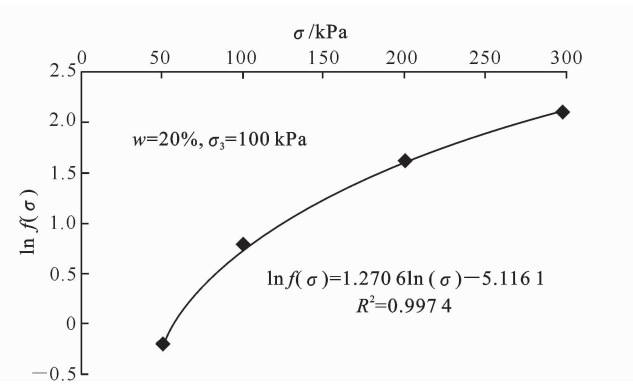


图 4 平面应变条件下 $\ln f(\sigma)$ 与 σ 的关系曲线
Fig. 4 Relationship between $\ln f(\sigma)$ and σ under plane strain state

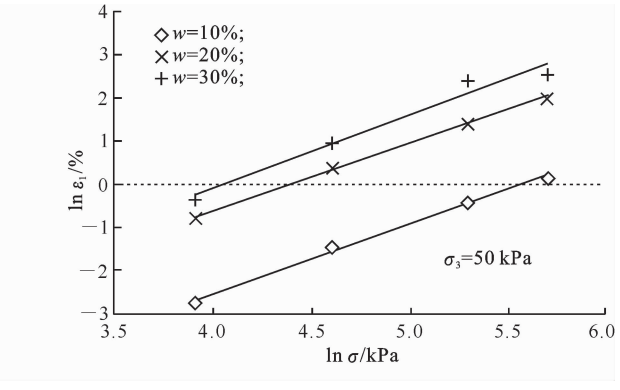


图 5 不同含水率下 $\ln \epsilon_1$ 与 $\ln \sigma$ 的关系曲线
Fig. 5 Relationship between $\ln \epsilon_1$ and $\ln \sigma$ under different w

表 2 不同含水率和固结压力下蠕变模型参数的计算结果

Table 2 Calculation for creep model parameters under different w and σ_3

模型参数 Model parameter	$w=10\%$			$w=20\%$			$w=30\%$		
	50 kPa	100 kPa	150 kPa	50 kPa	100 kPa	150 kPa	50 kPa	100 kPa	150 kPa
A	1.611	1.097	1.409	1.551	1.407	1.489	1.706	1.533	1.386
B	-8.975	-6.292	-7.815	-6.811	-5.937	-6.385	-6.929	-6.541	-5.971
λ	0.049 5	0.066 5	0.042 4	0.052 7	0.058 1	0.046 1	0.052 3	0.052 2	0.067 3

从物理意义上讲,斜率 A 代表单位时刻应变随应力的变化趋势,若两斜率值接近,表示应力-应变关系曲线的形状相似。试验数据也表明, A 与试样含水率无明显关系。截距 B 为单位时刻单位应力时割线应变速率的对数,与含水率有关。从总体趋势上看,一般含水率越小,则 B 值越小;含水率越大,则 B 值一般也越大。由试验数据及图 3 发现,不同剪应力水平下 $\ln (\epsilon/t)$ 与 $\ln t$ 的关系呈线性分布,且所有线性基本保持平行,表明斜率 λ 值在一个很小的范围内浮动,可将 λ 视为定值。

利用剪应力 $\sigma=50,100,200,300$ kPa 时所有蠕变数据计算的模型参数值,验证剪应力 $\sigma=50,100,150,200,250,300$ kPa 的整个蠕变过程。图 6 是利用蠕变模型(公式(7))对试验曲线进行验证得到的不同剪应力条件下的 $\epsilon-t$ 关系曲线。由图 6 验证曲线可知,无论从数值还是曲线形式和走势上,模型计算值和实测值均比较接近,说明该模型公式能较好地模拟试验土样的平面蠕变规律,能为实际工程不同剪应力大小条件下的蠕变沉降提供一种计算方法。

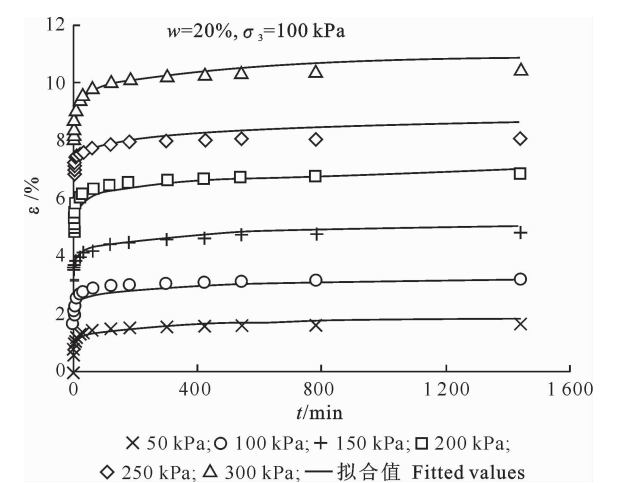


图 6 不同剪应力条件下的模型验证 $\epsilon-t$ 关系曲线
Fig. 6 Relationship between ϵ and t for model validation under different σ

4 结 论

- 1)黄土试样含水率和固结压力是影响平面蠕变规律的两个重要因素,含水率越高,固结压力大小对蠕变的影响作用越明显。另外,剪应力大小对含水率较高和固结压力较低时的土体蠕变效应敏感性较强。
- 2)基于 Singh-Mitchell 模型、Mesri 模型等经典

蠕变模型,提出并建立了适合本试验的经验模型。通过对模型参数的探讨,研究了试样含水率、剪应力对模型的影响,且新模型具有参数少、计算方便等优点,能较好描述黄土平面蠕变规律,为实际工程蠕变沉降分析提供了一种新的计算方法。

[参考文献]

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程 [M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1997:1-3.
Liu Z D. Loess mechanics and engineering [M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1997:1-3.
- [2] 袁 静, 龚晓南, 益德清. 岩土流变模型的比较研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 772-779.
Yuan J, Gong X N, Yi D Q. Comparison study on rheological constitutive models [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 772-779.
- [3] 李军世, 孙 钧. 上海淤泥质粘土的 Mesri 蠕变模型 [J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 74-79.
Li J S, Sun J. Mesri's creep model for Shanghai silt-clay [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 74-79.
- [4] 王 琛, 胡德金, 刘浩吾, 等. 三峡泄滩滑坡体滑动带土的蠕变试验研究 [J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1007-1010.
Wang C, Hu D J, Liu H W, et al. Creep tests of sliding zone soils of Xietan landslide in Three Gorges Area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 1007-1010.
- [5] 卢萍珍, 曾 静, 盛 谦. 软黏土蠕变试验及其经验模型研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1041-1044.
Lu P Z, Zeng J, Sheng Q. Creep tests on soft clay and its empirical models [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1041-1044.
- [6] 王松鹤, 骆亚生. 复杂应力下黄土蠕变特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 43-47.
Wang S H, Luo Y S. Research on creep characteristics of loess under complex stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 43-47.
- [7] 唐 皓, 党 琪, 段 钊, 等. 关中咸阳地区 Q_2 黄土蠕变特性试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(6): 758-764.
Tang H, Dang Q, Duan Z, et al. Study on creep characteristics of Q_2 loess of Xianyang area in the Guanzhong basin [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(6): 758-764.
- [8] 林 斌, 赵法锁, 霍 亮. 黄土损伤与流变耦合模型及参数研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 685-691.
Lin B, Zhao F S, Huo L. Coupling study on damage and rheological model of loess and its parameter [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 685-691.
- [9] 唐亦川, 江丽华, 李晓军. 重塑黄土黏弹性特性试验研究与模型参数分析 [J]. 公路, 2011(6): 136-141.
Tang Y C, Jiang L H, Li X J. Experimental study and parameter analysis of remolded loess with viscoelasticity [J]. Highway, 2011(6): 136-141.
- [10] 王常明, 王 清, 张淑华. 滨海软土蠕变特性及蠕变模型 [J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(2): 227-230.
Wang C M, Wang Q, Zhang S H. Creep characteristics and creep model of marine soft soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 227-230.
- [11] 朱才辉, 李 宁, 刘俊平. 压实 Q_3 马兰黄土蠕变规律研究 [J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 392-399.
Zhu C H, Li N, Liu J P. Research on the creep behavior of compacted Q_3 Ma-Lan loess [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(4): 392-399.
- [12] 赵宪民, 段 钊, 何青峰, 等. 延安 Q_2 黄土三轴蠕变特性试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2012, 29(11): 77-82.
Zhao X M, Duan Z, He Q F, et al. Triaxial test on the creep characteristics of Q_2 loess in Yan'an [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(11): 77-82.
- [13] 龙建辉, 郭文斌, 李 萍, 等. 黄土滑坡滑带土的蠕变特性 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1023-1028.
Long J H, Guo W B, Li P, et al. Creep property of soil in sliding zone of loess landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1023-1028.
- [14] 朱鸿鹄, 陈晓平, 程小俊, 等. 考虑排水条件的软土蠕变特性及模型研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 694-698.
Zhu H H, Chen X P, Cheng X J, et al. Study on creep characteristics and model of soft soil considering drainage condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 694-698.
- [15] 周秋娟, 陈晓平. 软土蠕变特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 626-630.
Zhou Q J, Chen X P. Experimental study on creep characteristics of soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 626-630.
- [16] 陈晓平, 朱鸿鹄, 张芳枝, 等. 软土变形时效特性的试验研究 [J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(12): 2142-2148.
Chen X P, Zhu H H, Zhang F Z, et al. Experimental study on time-dependent deformation of soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2142-2148.
- [17] 付中原. 真三轴仪的平面应变改造及黄土平面应变实验研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009: 18-21.
Fu Z Y. The alteration of true triaxial apparatus and research of plane strain of loess [D]. Shaanxi, Yangling: Northwest A&F University, 2009: 18-21.
- [18] 李浩东. 陕北子洲黄土平面应变试验及滑坡机理分析 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
Li H D. Plane strain test and landslide mechanism analysis of loess from Zizhou of Northern Shaanxi [D]. Shaanxi, Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [19] Singh A, Mitchell J K. General stress-strain-time function for clay [J]. Journal of the Clay Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(1): 21-46.
- [20] Mesri G, Rebres-Cordero E, Shields D R, et al. Shear stress-strain-time behavior of clays [J]. Geotechnique, 1981, 31(4): 537-552.