

DOI: 10.7511/jslx20220815001

# 考虑参数随机性的压实黄土蠕变变形不确定性分析

胡长明<sup>\*1</sup>, 汪芳芳<sup>1</sup>, 朱武卫<sup>2</sup>, 袁一力<sup>1</sup>, 杨晓<sup>2</sup>, 柳明亮<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 西安 710082)

**摘要:** 现有蠕变模型的计算值为确定值, 未能考虑岩土材料和参数评估过程中的随机性。为反映岩土材料的变形随机特性, 基于多次重复的一维固结蠕变试验, 本文研究了分级和分别加载条件下压实黄土的蠕变特性, 建立了考虑参数随机性的改进 Merchant 模型, 提出了一种蠕变变形的不确定性预测方法, 并通过延安高填方工程进行了验证。结果表明, 压实黄土具有明显的衰减蠕变特性, 引入非线性元件的 Merchant 模型能更好描述土体的应变时间关系, 考虑参数随机性的模型计算值近似服从正态分布; 通过不确定性预测方法可以获得蠕变变形值的概率云图, 且工程实测蠕变变形值落在预测范围的 95% 的置信区间内, 说明了考虑参数随机性的蠕变变形不确定性预测方法的有效性。

**关键词:** 压实黄土; 蠕变; 改进 Merchant 模型; 工程预测; 随机性

**中图分类号:** O344.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-4708(2024)02-0226-07

## 1 引言

随着西北地区基础设施的大规模建设, 以压实黄土作为主要填料而形成的黄土高填方工程大量涌现, 随之而来的出现了许多与时间有关的黄土变形、强度与稳定性问题, 如边坡失稳、建筑物沉降和路面开裂等工程问题<sup>[1]</sup>。而这些工程问题均与黄土的蠕变行为密切相关, 较为突出的是以压实黄土为填料的高填方工程的工后沉降问题。

在 20 世纪 50 年代, 国内外学者就开展了土体蠕变问题的研究<sup>[2-3]</sup>。近年来, 为解决地质差异和工程应用中的蠕变问题, 大量学者从不同方向出发, 提出了一系列用于预估土体蠕变的模型<sup>[4-7]</sup>。胡惠华等<sup>[8]</sup>研究了洞庭湖砂纹淤泥质土的蠕变特性, 建立了 5 参数修正 Singh-Mitchell 模型。元件模型因具有明确的物理意义, 应用更广泛。Tang 等<sup>[9]</sup>研究了不同含水率下黄土的蠕变特性, 提出了基于分数阶微积分和连续介质损伤力学的二元蠕变模型。由于岩土材料自身的内在随机性和参数评估过程导致的外在随机性, 大量学者采用统计学方法对岩土材料的强度、变形和稳定性问题进行研究<sup>[10-15]</sup>。江权等<sup>[16]</sup>针对两种玄武岩的特征强度

和变形参数的随机分布特性进行了分析, 发现其呈现不同的概率分布形式。土体的不均匀性和空间变异性会导致边坡变形破坏。Halder 等<sup>[17]</sup>将有限差分法与随机场模型相结合, 研究了土壤强度参数的空间变异性 and 随机性对边坡上条形基础的荷载-沉降响应的影响。以上学者针对特定地区的土体进行了蠕变问题的研究, 建立了相适应的模型, 但经验模型的普适性不好, 元件模型在描述土体的非线性蠕变时还存在不足。针对岩土材料的随机性问题, 大量学者研究了土体的变异性对土体的强度、边坡稳定性的影响, 但在蠕变变形方面研究较少, 现有的模型预测的变形值为确定值, 无法准确反映岩土材料的不确定性。因此, 建立改进适应于土体非线性特征的蠕变模型, 并引入随机性参数来进行模型预测对预防和控制高填方工后沉降和边坡失稳具有重要意义。

本文通过多次重复的一维固结蠕变实验, 探讨了压实黄土在分级和分别两种加载方式下的变形。改进了 Merchant 模型, 并在引入随机性参数的基础上建立了考虑随机性的预测模型。提出了一种蠕变变形的不确定预测方法, 为高填方工程的长期变形预测提供了参考。

## 2 重复性蠕变试验方案设计与结果分析

### 2.1 土样性质

试验土样取自陕西省延安市延安大学新校区

收稿日期: 2022-08-15; 修改稿收到日期: 2022-10-11.

基金项目: 国家自然科学基金(52178302); 陕西省重点研发计划(2021SF-523; 2022SF-375); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-375)资助项目.

作者简介: 胡长明<sup>\*</sup>(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师 (E-mail: hu\_tm@163.com).

高填方工程。土样以粉土和粉质黏土为主,属于 Q3 黄土,按照土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)进行室内试验,土样基本物理参数列入表 1。

表 1 土样物理性质指标

Tab.1 Physical properties of the soil samples

比重	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	按塑性图分类	颗粒组成/%		
					>0.075 mm	0.075 mm~0.005 mm	<0.005 mm
2.70	29.70	18.40	11.30	CL	1.05	78.43	20.52

2.2 试验方案

为研究多次重复试验条件下压实黄土在不同加载方式时的蠕变变形和重复试验下拟合曲线的模型参数随机性对变形的影响,本文选取了分别和分级加载两种不同的加载方式对试样进行加载,同时对不同压力下的试样分别进行了 3 次和 9 次重复性试验,具体的试验方案列入表 2。

表 2 试验方案

Tab.2 Testing program

试样编号	重复次数	干密度 /g·cm <sup>-3</sup>	含水率 /%	加载方式
重 C1-1~C5-3	3	1.6	10	分别:100 kPa,200 kPa,400 kPa,800 kPa,1600 kPa
塑 S1-1~S3-9	9	1.60, 1.68, 1.75	10	分级:100 kPa,200 kPa,400 kPa,800 kPa,1600 kPa

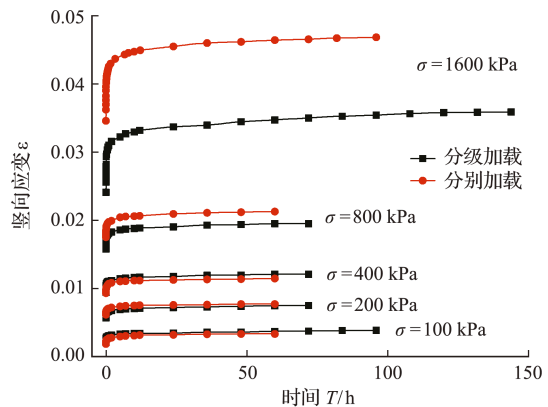
试验采用 WG 型单杠杆固结仪,数据测量采用千分表,试样尺寸为圆柱形 50 cm<sup>2</sup> × 2 cm。为保证试样与加载系统接触良好,试验是在 25 kPa 下预压稳定后,按照 100 kPa,200 kPa,400 kPa,800 kPa 和 1600 kPa 五级荷载进行加载,加载的稳定标准为 24 h 竖向累计变形小于 0.005 mm。为防止试验过程中试样水分的流失,在试样表面用保鲜膜包裹,并在试验结束后测其含水率。

2.3 试验结果分析

两种不同加载方式下的蠕变应变与时间的关系曲线如图 1 所示。可以看出,分别加载下,试样的变形随着荷载的施加会迅速增加并最终趋于稳定。土体在蠕变的过程中会经历结构损伤和愈合,初期结构因荷载作用而破坏,在蠕变后期由于愈合而变形趋于稳定,之后将再次进入结构损伤乃至破坏阶段。本文两种加载方式下的试样均经历了衰减蠕变和稳定蠕变阶段,由于一维固结试验是在侧限条件下进行,故未出现加速破坏阶段。

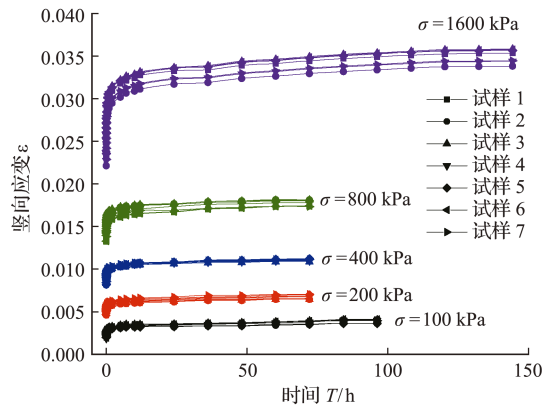
基于 Boltzmann 线性叠加法对分级加载下的数据进行处理。对比同一条件下的分级和分别加载应变时间曲线,发现除 100 kPa 和 400 kPa 荷载情况,其他各级荷载的分别加载蠕变值明显高于分

级加载蠕变值,且在 1600 kPa 时尤为显著。在去除 2 组差异较大的数据后获得了 7 组重复条件下的各级荷载的应变时间曲线,对比同一荷载下的 7 组曲线,发现 7 次试验的曲线的蠕变量相差不大,且在 1600 kPa 荷载下的蠕变稳定时间较长。



(a) 分级与分别加载对比

(a) Comparison of graded loading and separate loading



(b) 7次重复试验-分级加载

(b) 7 replicate experiments- graded loading

图 1 蠕变应变-时间曲线

Fig.1 Creep strain-time curves

3 改进 Merchant 模型及参数随机性分析

传统的 Merchant 模型是由 Hooke 体和 Kelvin 体串联而成的 3 参数元件模型,其蠕变方程为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} [1 - e^{-(E_1/\eta_1)t}] \quad (1)$$

式中  $\epsilon(t)$  为试样任意时刻的蠕变值,  $\sigma_0$  为竖向荷

载,  $E_0$  为 Hooke 模型的弹性系数,  $E_1$  和  $\eta_1$  分别为 Kelvin 模型的弹性系数和黏性系数。

Merchant 模型不能很好描述衰减蠕变到稳定蠕变阶段的变形;而 Burgers 模型的蠕变增长阶段发散,收敛性不好,对于蠕变稳定阶段的描述有限。故引入非线性元件以使 Merchant 模型更好描述土体的蠕变变形。定义一种非线性函数,

$$f(t) = at^b / (1 + at^b) \quad (2)$$

式中  $a$  和  $b$  为参数,其值大于零,  $t$  为时间。  $f(t)$  为连续增函数,当土体蠕变增加到一定时间时,  $f(t)$  接近于 1,则假定  $t$  取某一时刻之后,  $f(t) = 1$  且保持不变。朱才辉<sup>[18]</sup>在研究黄土蠕变模型时发现,Merchant 模型在恒定荷载下的应变保持不变,其在描述土体的衰减到稳定阶段的变形有局限性。因此,在 Merchant 模型上串联一个新的非线性元件,假定在恒定应力下,非线性元件弹性系数衰减规律满足,

$$E(t) = E_2 / f(t) \quad (3)$$

式中  $E_2$  为非线性元件的弹性系数初始值,将式(2)代入式(3),对模型施加恒定应力  $\sigma_0$ ,得改进的 Merchant 模型为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} [1 - e^{-(E_1/\eta_1)t}] + \frac{\sigma_0}{E_2} \frac{at^b}{1+at^b} \quad (4)$$

用 Origin 软件对蠕变试验数据进行模型拟合,由于篇幅有限,仅绘制 100 kPa 下 7 组重复试样的拟合曲线如图 2 所示,7 组试样的模型参数拟合值列入表 3。由拟合结果可知,压实黄土的蠕变规律较符合改进 Merchant 模型,其相关系数在 0.99 以上。7 组重复试验所得的 6 个参数的极差相对较小,变异系数均小于 15%,说明所得数据为正常数据,6 个拟合参数的数值具有一定的离散性和随机性。由于试验过程中存在制样、实验仪器和人为因素的影响,将各蠕变参数作为随机变量,通过马纪伟等<sup>[19,20]</sup>对模型蠕变参数和相应密度函数的分析,假定各蠕变参数变量近似服从正态分布。改进 Merchant 模型的参数  $E_0$  主要控制土体的瞬时变形,  $E_1, \eta_1, E_2, a$  和  $b$  则与土体的衰减和稳定

蠕变有关,6 个蠕变参数之间存在一定的联系,则将各参数变量视为一个样本,构成六维总体随机样本。

$$\mathbf{X} = [E_0 \ E_1 \ N_1 \ E_2 \ A \ B] \quad (5)$$

设  $x_{(i)} = [e_{0i} \ e_{1i} \ n_{1i} \ e_{2i} \ a_i \ b_i]$  ( $i = 1, \dots, n$ ) 为来自正态总体  $X \sim N_p(\mu, \Sigma)$  ( $p = 6$ ) 的一个随机样本,记样本数据矩阵为  $\mathbf{X} = (e_{0i} \ e_{1i} \ n_{1i} \ e_{2i} \ a_i \ b_i)_{n \times p}$ 。每次试验曲线拟合所得的参数为一个 6 维随机向量,如果同时对 6 个向量作一次观测,则得一个样品,观测 7 次得 7 个样品,则可以把 7 个样品排成一个  $7 \times 6$  的样本数据矩阵。假设改进 Merchant 模型曲线的 6 个参数共同构成的随机矩阵  $\mathbf{X}$  为六元正态随机向量,则六元函数的联合分布函数和联合密度函数为

$$F(e_0, e_1, n_1, e_2, a, b) = P\{E_0 \leq e_0, E_1 \leq e_1, \dots, B \leq b\}$$

$$f(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^6 |\Sigma|^{\frac{1}{2}}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}(x-\mu)' \Sigma^{-1} (x-\mu)\right] \quad (6)$$

随机向量  $\mathbf{X}$  的均值向量  $\mu$  和协方差阵  $\Sigma$  为

$$\mu = E(\mathbf{X}) = [E(E_0) \ E(E_1) \ E(N_1) \ E(E_2) \ E(A) \ E(B)]^T \quad (7)$$

$$\Sigma = E[(\mathbf{X} - E(\mathbf{X}))(\mathbf{X} - E(\mathbf{X}))^T] \quad (8)$$

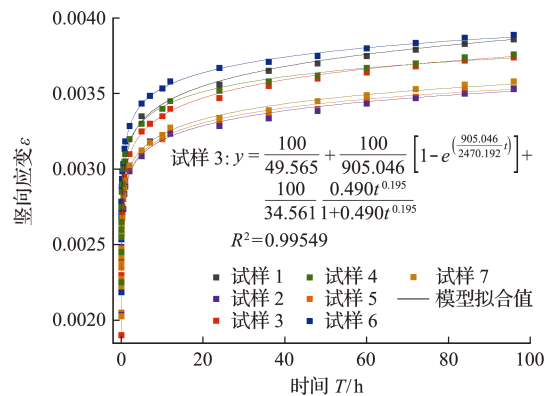


图 2 100 kPa 荷载下 7 组试样的模型拟合曲线  
Fig. 2 Model fitting curve of 7 groups of specimens under 100 kPa load

表 3 100 kPa 荷载下改进 Merchant 模型参数拟合值及统计特征

Tab. 3 Parameter fitting values and statistical characteristics of improved Merchant model under 100 kPa load

荷载/kPa	蠕变参数	一组	二组	三组	四组	五组	六组	七组	极差	均值	标准差	变异系数
100	$E_0$ /MPa	48.432	49.258	49.565	45.144	46.260	52.135	50.3762	6.990	48.738	2.214	0.045
	$E_1$ /MPa	923.144	897.384	905.046	919.440	916.184	884.869	924.817	39.947	910.126	13.808	0.015
	$\eta_1$ /MPa·h	2086.265	2663.139	2470.192	2326.049	2237.067	1837.066	2705.669	868.602	2332.207	288.536	0.123
	$E_2$ /MPa	35.534	37.099	34.561	38.649	36.939	41.301	39.855	6.7410	37.705	2.204	0.058
	$a$	0.548	0.533	0.490	0.529	0.557	0.457	0.505	0.099	0.517	0.032	0.062
	$b$	0.189	0.227	0.195	0.189	0.212	0.209	0.178	0.048	0.200	0.015	0.077

采用无偏估计的方法,由样本均值向量和协方差估计总体的均值向量和协方差。通过 Matlab 软件编码,计算蠕变参数样本的均值向量  $\bar{X}$ 、离差阵  $A$  和协方差阵  $S$ , 并使用 mvnrnd 函数随机生成 600 组蠕变参数。基于室内试验 5 级荷载下随机生成的蠕变参数,可求得各级荷载和给定时间下试样抽样的变形范围及其概率。100 kPa 荷载下 12 h~96 h 和 5 级荷载下 96 h 时试样随机抽样的变形概率如图 3 所示,通过随机生成的 600 组模型参数获得的各级荷载下试样 96 h 的变形范围列入表 4。

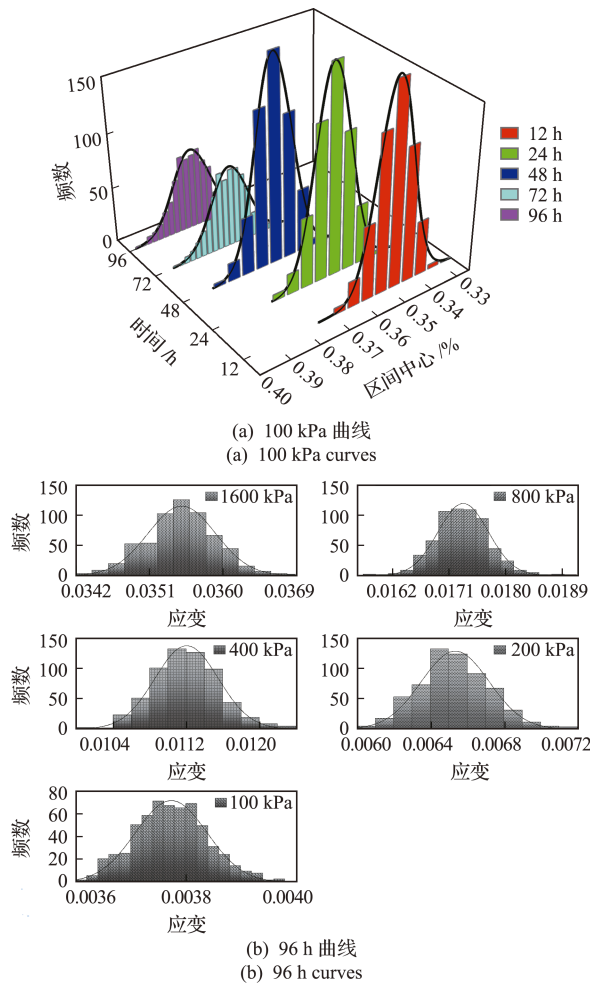


图 3 试样变形分布及概率密度曲线  
Fig. 3 Deformation distribution and probability density curve of specimens

表 4 随机抽样-试样 96 h 的变形指标  
Tab. 4 Random sample-deformation index of sample at 96 h

荷载/kPa	时间/h	均值/%	标准差/%	应变范围/%
100	96	0.377	0.007	0.36~0.40
200	96	0.653	0.019	0.60~0.72
400	96	1.120	0.035	1.02~1.23
800	96	1.778	0.040	1.63~1.94
1600	96	3.550	0.042	3.43~3.69

由图 3 和表 4 可知,各级荷载下随机抽样的变形分布符合正态分布,100 kPa 下 96 h 的应变均值为 0.377%,应变范围为 0.36%~0.40%;1600 kPa 下 96 h 的应变均值为 3.550%,应变范围为 3.43%~3.69%;荷载越大,其应变的离散程度越大。由于本文试验次数较少,随机抽样获得的变形范围具有局限性,但统计指标说明其模型的参数具有随机性,适当提高试验的重复次数,可以更加有效地提高试验的准确性。

### 4 蠕变变形不确定性预测方法

实际工程在施工中由于受岩土材料自身性质的随机性和施工中人为操作的外在随机性的影响,如地质条件、施工速度、压实工艺和施工过程等,其变形沉降具有差异性和不确定性。本文结合室内试验和实际工程分析,总结了一种蠕变变形的不确定性预测方法,如图 4 所示。基于室内固结试验获得应变时间曲线,使用改进 Merchant 模型拟合曲线获得模型参数;假设参数服从六元正态分布,运用 Matlab 的 mvnrnd 函数随机生成  $n$  组蠕变参数值;结合施工资料,将室内试验的荷载进行等比缩放后再平均,求每层填方体的变形量;运用分层总和法和转化的沉降公式计算填方体的沉降量,对沉降预测值的变形范围进行不确定性分析,获得其预测范围的概率云图 and 不同置信水平下的预测范围。本文提出的蠕变变形不确定性预测方法考虑了施工中的随机性问题,可为实际工程的变形预测提供参考。

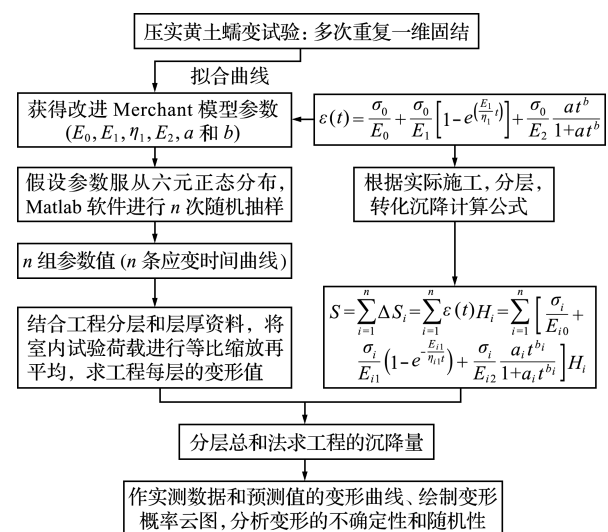


图 4 不确定性预测流程图  
Fig. 4 Uncertainty prediction flowchart

### 5 方法的工程应用与验证

工程施工中由于地质差异和施工人员操作随

机性的影响,变形沉降量具有不均匀性和不确定性。以延安大学新校区高填方工程为例,采用考虑参数随机性的不确定性预测方法进行预测。

### 5.1 模型建立

本文改进 Merchant 模型的计算结果为一定时间和荷载下应变与时间的关系,对于实际工程的填方体,需要结合分层总和法进行改进。改进 Merchant 模型转化为实际工程的沉降计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \sum_{i=1}^n \epsilon(t) H_i = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\sigma_i}{E_{i0}} + \frac{\sigma_i}{E_{i1}} (1 - e^{-\frac{E_{i1}}{\eta_{i1}} t}) + \frac{\sigma_i}{E_{i2}} \frac{a_i t^{b_i}}{1 + a_i t^{b_i}} \right] H_i \quad (9)$$

式中  $S$  为工后土体总沉降量,  $i$  为土层序数,  $n$  为填方体层数,  $H_i$  为每层填土的厚度。

### 5.2 工程预测与验证

延安大学新校区高填方工程位于延安大学新校区西南侧,场地总体地形为东北高,西南低,坡体主要由更新统黄土组成,呈 V 型。场地内的地层可分为十五层,自上而下依次由第四系全新统压实填土( $Q_4^{ml}$ )、上更新统风积( $Q_3^{eol}$ )黄土、残积( $Q_3^{el}$ )古土壤、中更新统风积( $Q_2^{eol}$ )黄土、残积( $Q_2^{el}$ )古土壤、第三系( $N_2$ )红粘土及侏罗系中统富县组( $J_1 y^1$ )泥岩和砂岩构成。取施工现场部分土体进行室内试验,得土体的黏聚力为 35.55 kPa,内摩擦角为  $29.8^\circ$ ,最大干密度和最优含水率分别为  $1.79 \text{ g/cm}^3$  和 13.5%。填方体高程为 61.5 m,选取填筑体 0~8 测点为研究对象,填土重度平均值取  $20 \text{ kN/m}^3$ 。以 2 m~3 m 为单层土体的厚度,将土层分为 30 层,根据填土重度和填土厚度计算每层的上覆荷载。由施工资料可知,填方体的压实度为 0.93~0.98,本文取压实度 0.98,含水率 10% 条件下的模型参数进行计算,并参考文献[6]设定模型在  $t=1$  天时的沉降为瞬时沉降,后续时间发生的沉降为工后沉降。由于室内试验只进行了 5 级加载试验,为了与实际工程的上覆荷载对应,本文采用对 5 级加载试验的模型参数进行等比缩放后再平均的方法来求取工程中对应荷载下的变形。具体以  $i=6$ ,  $\sigma=240 \text{ kPa}$  为例。

$$\Delta S_{i=6} = \frac{1}{5} \left( \frac{240}{100} \epsilon(t)_{\sigma=100} + \frac{240}{200} \epsilon(t)_{\sigma=200} + \frac{240}{400} \epsilon(t)_{\sigma=400} \right) H_{i=6} + \frac{1}{5} \left( \frac{240}{800} \epsilon(t)_{\sigma=800} + \frac{240}{1600} \epsilon(t)_{\sigma=1600} \right) H_{i=6} \quad (10)$$

根据实际的施工过程,结合分层厚度和层数对随机产生的模型参数进行运算,将获得的沉降数据

与实际的工后沉降监测数据进行对比,如图 5 所示。可以看出,转化的沉降计算公式可以较好描述延安高填方的工后沉降的发展趋势,随着工后监测时间的增加,模型计算值的增加趋势在逐渐变缓,且工程实测蠕变变形值落在计算值的预测范围内。

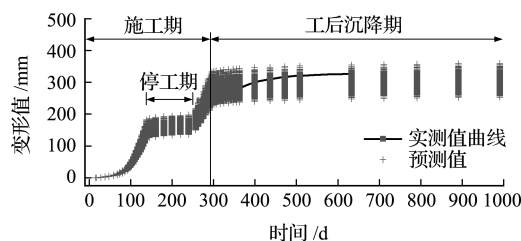


图 5 预测值与实测值曲线

Fig. 5 Curve of predicted value and measured value

根据 Matlab 软件随机生成 600 组蠕变参数, 100 kPa 时蠕变参数的分布如图 6 所示,各参数在一定范围内呈正态分布。从图 7 和图 8 可以看出,各个时间的沉降量以一定的概率在均值的置信区间内波动,离散性较大。随着时间的增大,其沉降的离散性越来越大,但在沉降趋于稳定时,沉降的离散程度也保持不变。本文不确定性预测方法计算得到的工程预测范围包含了实际值,且计算的预

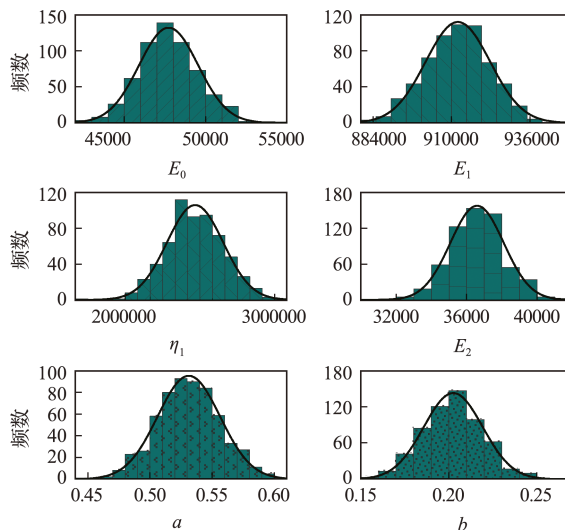


图 6 蠕变参数分布

Fig. 6 Distribution of creep parameters

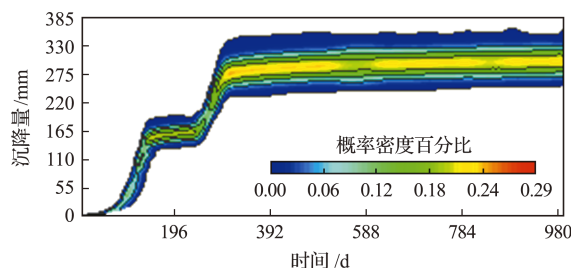


图 7 变形概率云图

Fig. 7 Cloud map of deformation probability

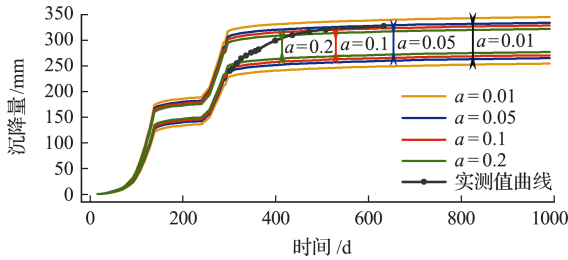


图8 变形-置信区间

Fig. 8 Deformation-confidence interval

测值的离散性较大,表明岩土材料和施工中人为因素产生的随机性对工程变形具有较大影响,施工中应考虑随机性,以更准确地对工程沉降进行预测。

## 6 结 论

基于重复性蠕变试验和本文提出的考虑参数随机性的蠕变变形不确定预测方法的工程应用,得出以下结论。

(1) 延安高填方压实黄土具有明显的衰减蠕变特性,本文分级和分别加载方式下的黄土试样均会经历衰减蠕变和稳定蠕变阶段,土体的蠕变特性在高填方变形计算中不能忽略。

(2) 引入非线性元件获得的改进 Merchant 模型可以更好地描述土体的蠕变特性。采用六元正态分布和 Matlab 软件对蠕变参数进行随机抽样,然后对随机生成的 6 个参数进行模型计算,获得试样的应变近似服从正态分布。本文抽样所得的变形范围具有一定的局限性,为提高试验的准确性,应加大试验的重复次数。

(3) 提出了一种考虑参数随机性的蠕变变形不确定性预测方法,采用该预测方法对延安高填方工程进行预测,可以获得蠕变变形的概率云图和变形的置信区间,其预测的沉降值在均值的置信区间内波动,且工程实测蠕变变形值落在预测范围的 95% 的置信区间内,说明本文提出的蠕变变形不确定性预测方法的有效性和可靠性,可为实际工程变形预测提供参考。

## 参考文献(References):

[1] Mei Y, Hu C M, Yuan Y L, et al. Experimental study on deformation and strength property of compacted loess[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2016, **11**(1): 161-175.

[2] Singh A, Mitchell J K. General stress-strain-time function for soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, **94**(1): 21-46.

[3] Mesri G, Febres-Cordero E, Shields D R, et al. Shear stress-strain-time behaviour of clays[J]. *Géotechnique*,

1981, **31**(4): 537-552.

- [4] 罗汀,陈栋,姚仰平,等.加载路径对重塑黄土一维蠕变特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(7): 1294-1299. (LUO Ting, CHEN Dong, YAO Yang-ping, et al. Influence of loading paths on one-dimensional creep characteristics of remodeled loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(7): 1294-1299. (in Chinese))
- [5] Wang X G, Wang J D, Zhan H B, et al. Moisture content effect on the creep behavior of loess for the catastrophic Baqiao landslide[J]. *CATENA*, 2020, **187**: 104371.
- [6] 葛苗苗,李 宁,郑建国,等.基于一维固结试验的压实黄土蠕变模型[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(11): 3164-3170, 3306. (GE Miao-miao, LI Ning, ZHENG Jian-guo, et al. A creep model for compacted loess based on 1D oedometer test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(11): 3164-3170, 3306. (in Chinese))
- [7] Tian X W, Xiao H B, Li Z Y, et al. A fractional order creep damage model for microbially improved expansive soils[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, **10**: 942844.
- [8] 胡惠华,贺建清,聂士诚.洞庭湖砂纹淤泥质土一维固结蠕变模型研究[J]. *岩土力学*, 2022, **43**(5): 1269-1276. (HU Hui-hua, HE Jian-qing, NIE Shi-cheng. One-dimensional consolidation creep model for sandy grain muddy soil of Dongting Lake[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, **43**(5): 1269-1276. (in Chinese))
- [9] Tang H, Duan Z, Wang D P, et al. Experimental investigation of creep behavior of loess under different moisture contents[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, **79**(1): 411-422.
- [10] 胡长明,袁一力,梅 源,等.基于二维随机场在圆弧曲线上局部平均化的边坡可靠度分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(2): 251-261. (HU Chang-ming, YUAN Yi-li, MEI Yuan, et al. Slope reliability analysis based on local averaging of two-dimensional random field on an arc curve[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(2): 251-261. (in Chinese))
- [11] Pepe G, Cevasco A, Gaggero L, et al. Variability of intact rock mechanical properties for some metamorphic rock types and its implications on the number of test specimens[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, **76**(2): 629-644.
- [12] 仇文岗,顾鑫,刘汉龙,等.基于贝叶斯更新的非饱和土坡参数概率反演及变形预测[J]. *岩土力学*, 2022, **43**(4): 1112-1122. (ZHANG Wen-gang, GU Xin, LIU Han-long, et al. Probabilistic back analysis of soil parameters and displacement prediction of unsaturated slopes using Bayesian updating[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, **43**(4): 1112-1122. (in Chinese))
- [13] 张牧子,孙永福,宋玉鹏,等.单轴压缩条件下溶蚀礁

- 灰岩细观变形破坏特征研究[J]. 计算力学学报, 2021, **38**(2): 222-229. (ZHANG Mu-zi, SUN Yong-fu, SONG Yu-peng, et al. Study on the microstructure and failure characteristics of limestone in dissolution reef under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, **38**(2): 222-229. (in Chinese))
- [14] Yuan Y L, Hu C M, Mei Y, et al. Slope reliability analysis based on curvilinear local averaging of a 2D random field[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, **137**: 104247.
- [15] 杨 杰, 陈佳莹, 尹振宇. 砂土初始孔隙比空间变异性对其力学特性及破坏模式的影响分析[J]. 计算力学学报, 2021, **38**(6): 754-762. (YANG Jie, CHEN Jia-ying, YIN Zhen-yu. Influence of spatial variability of initial void ratio on the mechanical response and failure mode of sand[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, **38**(6): 754-762. (in Chinese))
- [16] 江 权, 崔 洁, 冯夏庭, 等. 玄武岩力学参数的随机性统计与概率分布估计[J]. 岩土力学, 2017, **38**(3): 784-792. (JIANG Quan, CUI Jie, FENG Xia-ting, et al. Stochastic statistics and probability distribution estimation of mechanical parameters of basalt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(3): 784-792. (in Chinese))
- [17] Halder K, Chakraborty D. Influence of soil spatial variability on the response of strip footing on geocell-reinforced slope [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, **122**: 103533.
- [18] 朱才辉. 深厚黄土地基上机场高填方沉降规律研究[D]. 西安理工大学, 2012. (ZHU Cai-hui. Settlement Regularity Study of Loess-High Filled Airport Foundation with Large Thickness[D]. Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [19] 马纪伟, 王芝银. 基于多元正态分布理论的盐岩蠕变参数概率分布[J]. 科技导报, 2013, **31**(36): 41-45. (MA Ji-wei, WANG Zhi-yin. Probability distribution of rock salt creep parameters based on multivariate normal distribution[J]. *Science & Technology Review*, 2013, **31**(36): 41-45. (in Chinese))
- [20] 张继周, 缪林昌. 岩土参数概率分布类型及其选择标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(S2): 3526-3532. (ZHANG Ji-zhou, MIAO Lin-chang. Probability distribution types of geotechnical parameters and their selection criteria[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(S2): 3526-3532. (in Chinese))

## Uncertainty analysis of creep deformation of compacted loess considering parameters randomness

HU Chang-ming<sup>\*1</sup>, WANG Fang-fang<sup>1</sup>, ZHU Wu-wei<sup>2</sup>,  
YUAN Yi-li<sup>1</sup>, YANG Xiao<sup>2</sup>, LIU Ming-liang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Architecture Science Research Institute, Xi'an 710082, China)

**Abstract:** The calculated value of existing creep model is a deterministic value, which fails to consider the randomness in the evaluation process of geotechnical materials and parameters. To reflect the random deformation characteristics of geotechnical materials, this paper studied the creep characteristics of compacted loess under graded and separate loading conditions based on repeated 1D compression creep tests. An improved Merchant model considering parameter randomness was established. An uncertainty prediction method for creep deformation was proposed and verified by a high-fill project in Yan'an. The results show that the compacted loess has obvious decaying creep characteristics. The Merchant model with nonlinear elements can better describe the strain-time relationship of the soil. The calculated value of the model considering parameter randomness approximately obeys the normal distribution. The uncertainty prediction method can obtain the probability cloud map of the creep deformation value, and the measured creep deformation value of the project falls within the 95% confidence interval of the predicted range. This shows that the creep deformation uncertainty prediction method considering parameter randomness is effective.

**Key words:** compacted loess; creep; improved Merchant model; engineering prediction; randomness

引用本文/Cite this paper:

胡长明, 汪芳芳, 朱武卫, 等. 考虑参数随机性的压实黄土蠕变变形不确定性分析[J]. 计算力学学报, 2024, **41**(2): 226-232.

HU Chang-ming, WANG Fang-fang, ZHU Wu-wei, et al. Uncertainty analysis of creep deformation of compacted loess considering parameters randomness[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, **41**(2): 226-232.