

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

黄土地基震陷可靠度分析Kriging代理模型研究

胡长明,张思梦,钱家志,张 勇

Reliability analysis of seismic subsidence of loess foundation based on Kriging surrogate model

HU Changming, ZHANG Simeng, QIAN Jiazhi, and ZHANG Yong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306006

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

陕西富平黄土震陷特性及震陷小区划

Characteristics of loess seismic subsidence and corresponding micro-zonation for the Fuping Country, Shaanxi 任森, 邓龙胜, 范文, 徐良鑫, 刘少鹏 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 134-143

融合多源信息的降雨入渗边坡概率反分析及可靠度预测

Probabilistic inverse-analysis and reliability prediction of rainfall-induced landslides for slope with multi-source information 揭鸿鹄, 蒋水华, 常志璐, 黄劲松, 黄发明 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 28-36

基于节理不确定性的可靠度分析

Reliability analysis based on joint uncertainty: A case study of a rock slope in Tibet 胡康, 任光明, 常文娟, 李征征, 邹林志 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(2): 53-60

黄土潜蚀机理及其致灾效应研究综述

A review on loess subsurface-erosion mechanism and it's hazard effects 张卜平, 朱兴华, 成玉祥, 张智锋, 孙恒飞, 蔡佳乐 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 41-52

基于InSAR监测和PSO-SVR模型的高填方区沉降预测

Subsidence prediction of high-fill areas based on InSAR monitoring data and the PSO-SVR model 李华蓉, 戴双, 郑嘉欣 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 127-136

降雨型浅层黄土滑坡危险性评价与区划

Hazard assessment of shallow loess landslides induced by rainfall: A case study of Liulin County of Shanxi Province 李艳杰, 唐亚明, 邓亚虹, 宋焱勋, 慕焕东, 山聪, 崔思颖 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(2): 105-114



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306006

胡长明,张思梦,钱家志,等. 黄土地基震陷可靠度分析 Kriging 代理模型研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 106-114. HU Changming, ZHANG Simeng, QIAN Jiazhi, et al. Reliability analysis of seismic subsidence of loess foundation based on Kriging surrogate model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 106-114.

黄土地基震陷可靠度分析 Kriging 代理模型研究

胡长明1,张思梦2,钱家志1,张 勇3

 (1. 西安建筑科技大学土木工程学院,陕西西安 710055; 2. 中国能源建设集团甘肃省电力设计院 有限公司,甘肃 兰州 730050; 3. 西安建筑科技大学管理学院,陕西西安 710055)

摘要:为评估黄土地基在发生地震期间出现的震陷安全水平,本文提出了一种基于 Kriging 代理模型的黄土地基震陷可靠 度分析方法,采用拉丁超立方抽样(LHS)抽取随机变量的样本点,通过 FLAC^{3D} 有限差分软件建立黄土地基数值模型并计 算所抽样本点对应的响应值作为建立 Kriging 代理模型所需的训练样本点,结合蒙特卡罗法计算黄土地基震陷的可靠度, 并分析随机变量的变异性对震陷可靠度的影响。算例分析结果表明:提出的震陷可靠度计算方法相比传统的确定性计 算方法能够合理地考虑土性参数的变异性,更加符合实际情况,具有更好的可靠性和适用性。黏聚力的变异系数对震陷 最大可靠度的影响更为显著。

关键词:Kriging代理模型;黄土地基;震陷;可靠度;Monte Carlo 中图分类号:TU444 文献标志码:A 文章编号:1003-8035(2024)06-0106-09

Reliability analysis of seismic subsidence of loess foundation based on Kriging surrogate model

HU Changming¹, ZHANG Simeng², QIAN Jiazhi¹, ZHANG Yong³

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

2. China Energy Construction Group, Gansu Electric Power Design Institute Co. Ltd., Lanzhou, Gansu 730050, China;

3. College of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: In order to evaluate the safety level of seismic subsidence of loess foundation during earthquakes, this paper proposes a reliability analysis method based on the Kriging surrogate model. The sample points of random variables are extracted based on Latin hypercube sampling (LHS). A numerical model of the loess foundation is established using FLAC^{3D} finite difference software, and response values corresponding to the sample point is calculated as the training sample point for establishing Kriging surrogate model. The reliability of seismic subsidence of loess foundation is calculated by Monte Carlo method, and the influence of variability of random variables on seismic subsidence reliability is analyzed. The results show that the proposed seismic subsidence reliability calculation method can reasonably consider the variability of soil parameters compared to traditional deterministic methods, making it more practical with better reliability and applicability. The variation coefficient of cohesion significantly affects the maximum reliability of seismic subsidence.

Keywords: Kriging surrogate model; loess foundation; seismic subsidence; reliability; Monte Carlo

收稿日期: 2023-06-04;修订日期: 2023-12-29 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

基金项目:陕西省自然科学基础研究计划项目(2021JLM-52)

第一作者: 胡长明(1963—), 男, 河南信阳人, 教授、博士生导师, 主要从事施工技术与管理方面的教学和科研工作。 E-mail: hu.tm@163.com

通讯作者: 张思梦(1997—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 研究方向为黄土震陷评价。E-mail: 1042512639@qq.com

0 引言

地基稳定性受多种因素影响^[1-2],特别是黄土地区, 受震陷影响很大。黄土震陷作为一种严重的地质灾害, 一旦发生将会造成非常严重的后果。前人对与黄土震 陷的研究基本是以动三轴试验为主,以单个震陷量作为 震陷性的主要的评价指标^[3-6]。然而黄土地基震陷的准 确性评价受到土性参数不确定性的影响,其中物理力学 指标的概率分布类型和变异性会对评价结果产生影响。 针对岩土工程中参数、计算模型、荷载等不确定性问 题,其主要的不确定性分析方法包括:概率分析方法^[7]、 随机有限元法^[8]、灰色系统评价法^[9]、模糊数学法^[10]、神 经网络评价方法^[11]等。这些不确定性方法可以考虑得 更加全面,从而提高评价结果的准确性,使结果更为科 学合理。

关于黄土震陷在不确定性方面的研究,李波等^[12]采 用灰色关联方法和逐步判别方法建立了耦合式软土震 陷判别模型从而实现软土震陷等级的判定。在黄土震 陷概率评价方面,谭芳^[13]将概率地震危险性分析方法引 人震陷计算中,采用不确定性分析方法分析了黄土震陷 与地震参数之间的关系,从而提出一种考虑地震随机性 的黄土震陷预测方法。任森等^[14]基于大量动三轴试验, 结合场地地震危险性概率分析方法,确定了研究区内的 震陷区划。孙军杰等^[15]依据残余应变估算模型采用概 率统计等非确定性分析方法对地基动力沉降进行了概 率分析。可见概率分析方法在土体动力沉降中已经得 到了初步研究。

然而到目前为止,还没有研究将可靠度理论应用 于黄土地基震陷的分析中。因此本文尝试将可靠度 理论应用于黄土地基震陷评价中,使用可靠度方法对 黄土地基震陷性进行分析。可靠度方法和传统的确 定性分析方法相互补充与结合,有助于进行震陷可靠度 分析。

1 黄土地基震陷可靠度指标

可靠度理论在边坡稳定分析中被广泛应用,而边坡 工程的不确定因素主要为土体参数的抗剪强度(内摩 擦角、黏聚力)^[16-18]。其依托蒙特卡洛分析法通过计算 出多组安全系数值将小于1的安全系数的次数与计算 次数的比值称作失效概率。因此可求得对应的可靠度 指标(β)为:

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_{\rm f}) \tag{1}$$

式中: Ф——标准正态分布的累计分布函数;

$P_{\rm f}$ ——失效概率。

在目前已有的地震灾害评估中,尚未有关于地基震 陷量的标准划分依据。根据中国地震局发布的《震害调 查及地震损失评定工作指南》,可以采用"地基基础 破坏等级标准"来评估震陷灾害的程度^[16],将震陷量小 于 2 cm 的定义为基本完好,震陷量大于 40 cm 的定义 为破坏。

参考可靠度理论在边坡稳定性评价中的应用,结合 黄土动力学对震陷等级的划分,本文提出了一种对黄土 地基震陷评价的可靠度指标。

(1)最大可靠度

在震陷等级划分中将震陷量大于 40 cm 的定义为 震陷破坏,因此可采用破坏概率(P_d)来判定其震陷破坏 状态,即 $P_d = P(S \ge 40)$ 。将 β_d 定义为:

$$\beta_{\rm d} = \frac{40 - u_{\rm s}}{\sigma_{\rm s}} \tag{2}$$

式中: u_s——震陷量的平均值;

 σ_s ——震陷量的标准差。

如果震陷量符合标准正态分布,破坏概率与可靠度的关系可表示为:

$$P_{\rm d} = P(S > 40) = 1 - \Phi\left(\frac{40 - u_{\rm s}}{\sigma_{\rm s}}\right) = 1 - \Phi(\beta_{\rm d})$$
 (3)

则根据可靠度理论,将破坏概率对应的可靠度称为 最大可靠度(β_d),也就是指衡量地基震陷最大安全程度 的标准,其计算公式为:

$$\beta_{\rm d} = \Phi^{-1}(1 - P_{\rm d}) \tag{4}$$

根据蒙特卡罗可靠度计算方法可定义破坏概率为:

$$P_{\rm d} = \frac{M}{N} \tag{5}$$

式中: P_d——地基震陷破坏概率;

M——抽样次数中震陷量大于 40 cm 的次数;

N——蒙特卡洛分析法总的抽样次数。

(2)最小可靠度

在震陷等级划分中将震陷量小于 2 cm 的定义为基本完好,因此可采用完好概率(P_h)来判定其完好状态,即 $P_h = P(S \leq 2)$ 。将 β_h 定义为:

$$\beta_{\rm h} = \frac{2 - u_{\rm s}}{\sigma_{\rm s}} \tag{6}$$

式中: u_s——震陷量的平均值;

 σ_s ——震陷量的标准差。

如果震陷量符合标准正态分布,完好概率(P_h)与可 靠度的关系可表示为:

$$P_{\rm h} = P(S < 2) = \Phi\left(\frac{2 - u_{\rm s}}{\sigma_{\rm s}}\right) = \Phi(\beta_{\rm h}) \tag{7}$$

根据可靠度理论,将完好概率对应的可靠度称为最 小可靠度(β_h),也就是指衡量地基震陷完好程度的标 准,其计算公式为:

$$\beta_{\rm h} = \Phi^{-1}(P_{\rm h}) \tag{8}$$

根据蒙特卡罗可靠度计算方法可定义完好概率为:

$$P_{\rm h} = \frac{M}{N} \tag{9}$$

式中: P_h——地基完好概率;

M——抽样次数中震陷量小于 2 cm 的次数; *N*——蒙特卡洛分析法总的抽样次数。

2 基于 Kriging 代理模型的震陷可靠度计算

2.1 Kriging 代理模型的建立

Kriging 模型是一种基于方差最小的无偏估计方法,它的原理是通过已知样本点的线性加权法来预测未知点的函数值,即已知加权系数插值就可求得变量空间内任一点的函数值。Kriging 代理模型通常情况下由回归部分和随机误差两部分所组成。将其用输出变量*S*(*x*) 与输入变量 *x* 表示为:

$$S(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{m} \beta_i f(\mathbf{x}) + z(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x})^T \boldsymbol{\beta} + z(\mathbf{x})$$
(10)

式中:每个样本点中输入变量的个数为 $n, x = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^T, f(x) = [f_1(x), f_2(x), \cdots, f_m(x)]^T$ 为回归多项式基函数向量, m 为回归多项式的数量; $\beta = [\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_m]^T$ 为 多项式参数向量, z(x) 为一均值为 0, 方差为 σ^2 的正态随 机过程, 该随机过程的协方差为:

$$COV[z(u), z(v)] = \sigma^2 R(u, v)$$
(11)

其中, R 表示任意两点 u, v 的相关函数, 通常取为高斯相关方程, 即:

$$R(u,v) = \exp\left\{-\theta(u-v)^2\right\}$$
(12)

其中, θ为相关参数, 可通过最大似然估计得到:

$$\theta = \max\left\{-\left[\frac{1}{2}\ln\left(|R|\right)\right] + \frac{k}{2}\ln\left(\sigma^{2}\right)\right\}$$
(13)

其中, R 为相关矩阵, 元素 R=R(u,v)。

基于给定的样本点,多项式参数向量 β 与随机过程 方差 σ^2 的估计值分别为:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\beta}} = \left(\boldsymbol{F}^{T}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{F}\right)^{-1}\boldsymbol{F}^{T}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{Y} \\ \hat{\boldsymbol{\sigma}}^{2} = \frac{1}{k}\left(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{\beta}}\right)^{T}\boldsymbol{R}^{-1}\left(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{\beta}}\right) \end{cases}$$
(14)

其中,F为由回归多项式函数值构成的矩阵。

对于任意输入变量 x_0 ,假定 x_0 与输入变量样本X之间的相关系数向量为 $r_0 = [R(x_0, x_1), \dots, R(x_0, x_k)]^T$ 利用式(10)构建的 Kriging模型表达式,可以得到与 x_0 对应的系统响应值 $S(x_0)$ 的预测值 $\hat{S}(x_0)$ 服从正态分布 $N(\hat{S}(x_0), \hat{\sigma}^2_S(x_0)), S(x_0)$ 的最佳线性无偏估计及均方误差可表示为:

$$\begin{cases} \hat{S}(x_0) = f^T(x_0)\hat{\boldsymbol{\beta}} + \boldsymbol{r}_0^T \boldsymbol{R}^{-1} (\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{\beta}}) \\ \hat{\sigma}_{\hat{S}}^2(x_0) = \hat{\sigma}^2 \left(1 + \boldsymbol{u}^T (\boldsymbol{F}^T \boldsymbol{R}^{-1} \boldsymbol{F})^{-1} \boldsymbol{u} - \boldsymbol{r}_0^T \boldsymbol{R}^{-1} \boldsymbol{r}_0 \right) \end{cases}$$
(15)

其中, $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{F}^T \boldsymbol{R}^{-1} \boldsymbol{r}_0 - \boldsymbol{f}_o$

本文进行震陷可靠度分析时,式(10)—(15)中应 用 Kriging 模型构建和预测其过程,采用 MATLAB 中 的 DACE 工具箱实现。

2.2 黄土地基数值模型

采用 FLAC^{3D} 有限差分软件建立黄土地基数值模型, 模型尺寸设置为 15 m×15 m×15 m,模型网格数为 3 375, 本构模型选择 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。在静力 分析时,底面和侧面选用固定边界,限制底面与侧面的 位移和速度,顶部为自由边界。动力分析与静力分析不 同,由于地震荷载会存在波的反射,因此在模型底面设 置静态边界,侧面设置为自由场边界,模拟土体在实际 中的状态(图 1)。



Fig. 1 Model and free-field boundary

本文选用三条地震波分别是 Kobe 地震波、Imperial 地震波和一条人工合成波。为方便后续说明,这里将选用 的三条地震波分别命名为地震波 1、地震波 2 及地震波 3。地震波 1 的持续时间为 25 s,时间间隔为 0.02 s,最 大加速度为 0.345g,地震波 2 的持续时间为 40 s,时间 间隔为 0.01 s,最大加速度为 0.313g,地震波 3 的持续时 间为 20 s,时间间隔为 0.02 s,最大加速度为 0.153g。图 2 为经过滤波以及基线校正后所选地震波的时程曲线。



图 2 地震波时程曲线 Fig. 2 Seismic wave time history curve and response spectrum curve

为了研究不同地震水平作用下震陷变形规律,将其改变幅值的大小来满足不同工况的需要,得到 0.1g、0.2g、0.3g、0.4g、0.5g、0.6g、0.7g不同峰值加速度大小的 7 种水平。其计算所得震陷量结果如表 1 所示。

2.3 震陷变形影响因素敏感性分析

岩土体材料参数存在着变异性,但土体泊松比的变

表 1 不同地震波及不同峰值加速度作用下地基震陷量 Table 1 Seismic subsidence of foundation under different seismic waves and peak accelerations.

峰值加速度/g	震陷量/cm			
	地震波1	地震波2	地震波3	
0.1	0.72	1.95	2.65	
0.2	2.37	8.40	13.44	
0.3	9.10	16.02	21.62	
0.4	17.83	21.44	29.52	
0.5	19.78	25.29	37.06	
0.6	20.08	30.67	40.98	
0.7	20.48	35.84	46.98	

异系数非常小,在考虑土性参数不确定时可将其看作常量。孙军杰等^[17]通过理论分析,给出了非饱和黄土动残余应变与黏聚力、内摩擦角、初始孔隙比、土层重度、 土层埋深以及地震动荷载之间的定量关系式。压缩模量是体现土体压缩性的指标之一,作为土体的力学性质,在分析地基土体变形或沉降时起着重要作用,而土体的黏聚力和内摩擦角反映土体的强度特征,在静力分析中,黄土地基静力参数中密度对于计算结果的影响较明显。因此,这里选择密度、弹性模量、黏聚力及内摩 擦角四种参数。采用 FLAC^{3D} 结合灰色关联分析对影响黄土地基震陷变形的因素做敏感性分析,求得其密度、弹性模量、黏聚力及摩擦角四个参数的灰色关联度为 $q = [0.656 \, 8, 0.856 \, 2, 0.668 \, 5, 0.728 \, 1], 敏感性排序为:弹性模量>内摩擦角>黏聚力>密度。$

2.4 土性参数分布概率模型

本节选取密度(ρ)、压缩模量(E_s)、黏聚力(c)及内 摩擦角(φ)四种参数作为黄土震陷性评价的参数指标来 进行分布概率模型研究。为了全面分析不同地貌单元 4种土性参数的最优概率分布,选用可以包含大部分不 确定性因素的概率分布形式包括正态分布、对数正态 分布和威布尔分布进行假设检验。从而确定每个参数 的最优概率分布形式^[18]。

为获取原状黄土地基土性不同参数的分布概率模型,基于引汉济渭工程的渭河二级阶地地貌土体为例, 通过对原状黄土的各种物理力学指标进行统计分析,得 出各指标服从的概率密度函数及分布参数,图3所示为 渭河二级阶地分布概率模型图,其中f(x)表示概率密度 函数。

由图 3 可知,从分布形态上来看,ρ值的正态分布和 对数正态分布整体较一致,两者均属于左偏态;其余三 种土性参数正态分布、对数正态分布及威布尔分布三 者分布较离散,差异性较大。

通过 K-S 检验法对 4 种土性参数的 3 种分布概率



图 3 不同参数的概率密度分布图 Fig. 3 Probability density distribution plots of different parameters

模型进行检验,求出样本值的理论累计概率分布与经验 累计概率分布的最大差值(D_{max}),与由显著性水平和样 本数确定临界值(D_n^α)进行比较,计算结果如表2所 示。四种参数均可接受正态分布、对数正态分布和威 布尔分布。*c*、*E*。值的最优分布是正态分布, φ、ρ值的 最优分布是威布尔分布,考虑到正态分布的优良性质, 将正态分布作为4种土性参数的分布概率模型用于震 陷可靠度计算。

表 2 分布假设检验结果 Table 2 Distribution hypothesis test results

_			-			-			
					验证约	吉果 D_{\max}			
	检验参数	样本量	正态	分布	对数正	态分布	威布尔	示分布	可接受的临界值 $D_n^{\alpha}/(\alpha = 0.05)$
			结果	D _{max}	结果	D _{max}	结果	D_{\max}	- n ² · · · ·
	内摩擦角	24	\checkmark	0.180	\checkmark	0.223		0.093	0.273
	黏聚力	24	\checkmark	0.099	\checkmark	0.125	\checkmark	0.102	0.273
	压缩模量	24	\checkmark	0.094	\checkmark	0.146	\checkmark	0.164	0.273
	密度	48	\checkmark	0.150	\checkmark	0.185	\checkmark	0.115	0.196

2.5 基于 Kriging 代理模型的震陷可靠度计算方法 本节基于 Kriging 代理模型对地基震陷可靠度进行 计算,这里进行 10 000 次模拟,计算步骤如下:

(1)根据前文统计出的土性参数(密度、压缩模量、 黏聚力、摩擦角)的概率分布模型,确定地基土体参数 的均值、标准差、分布类型等统计特性。

(2)FLAC^{3D}6.0 内置有 Python 编程语言,可以实现

蒙特卡洛抽样与连续计算,利用 Itasca 开发的专门用于 Python 扩展编程的程序库,通过编程实现随机变量拉丁 超立方抽样(LHS)、模型的建立以及计算,即会产生 N组计算方案 $(\rho_1, E_{s1}, c_1, \varphi_1), (\rho_2, E_{s2}, c_2, \varphi_2), \dots, (\rho_n, E_{sn}, c_n, \varphi_n),$ 然后计算出对应的响应值。将计算模型文件保存 为"n.f3sav",后续模型按顺序编号,并将其作为源文件 以便后续提取。 (3)对地震波设计不同的工况组合,计算每组工况 下 LHS 的样本所对应的震陷量,并保存计算模型。

(4)利用 Python 编程语言从结果文件中批量提取 竖向变形。

(5)采用 MATLAB 软件分别建立不同工况下的 Kriging 代理模型, 以 4 种土体参数为输入, 相应的地基 震陷量为输出, 对代理模型进行训练, 得到满足精度要 求的代理模型。经适当训练的代理模型能够较好地逼 近实际情况, 在此基础上可以十分方便地预测震陷值从 而实现震陷可靠度的计算(图 4)。



图 4 基于 Kriging 代理模型的震陷可靠度计算流程 Fig. 4 Calculation process of seismic subsidence reliability based on the Kriging surrogate model

3 算例分析

为验证本文提出方法的适用性,本节以引汉济渭工 程为背景结合 Kriging 代理模型的震陷概率计算方法开 展黄土地基震陷可靠度分析。

(1)最大可靠度

表 3 为不同地震波及不同地震峰值加速度作用下 地基震陷的破坏概率,以渭河二级阶地为例。

 表 3
 不同地震波作用下地基震陷破坏概率

 Table 3
 Probability of foundation subsidence failure under different seismic wave effects

 加速度/g
 地震波1
 地震波2

 0.1
 0
 0

/加速/文/g	地应现工	地辰极2	地成议
0.1	0	0	0
0.2	0	0	0
0.3	0	0	0
0.4	0	0.072	0.116
0.5	0	0.17	0.378
0.6	0	0.232	0.704
0.7	0.002	0.264	0.888

由表3可知,在地震波1的作用下,该地基土体在 地震波峰值加速度为0.7g时会出现破坏的概率,在地 震波2和地震波3的作用下,在峰值加速度达到0.4g 时会出现破坏的概率。三条地震波在峰值加速度达到 最大时,其产生的破坏概率也有巨大差异,地震波1在 峰值加速度为0.7g时破坏概率为0.002,地震波2在峰 值加速度为0.7g时破坏概率为0.264,地震波3在峰值 加速度为0.7g时破坏概率为0.888。

依据式(4)求得最大可靠度指标,图 5 为不同地震 波作用下地基震陷的可靠度指标随峰值加速度的变化 规律,最大可靠度指标的范围为-1.216~4.526。总体上 可靠度指标随峰值加速度的增加呈非线性减小。但三 条地震波的减小斜率并不相同,在地震波 3 作用下,可 靠度指标随峰值加速度的变化斜率最大,说明在地震 波 3 作用下,地基的可靠度受地震波峰值加速度的影响 最大。对于已知地震波峰值加速度,可以快速粗略估计 地基震陷的破坏概率,而不是单纯以震陷量来评价,这 在风险评估中具有更为重要的意义。



图 5 可靠度分析获得的地基震陷最大可靠度 Fig. 5 Maximum reliability index of foundation seismic subsidence

obtained from reliability analysis

(2)最小可靠度

表 4 为不同地震波及不同地震峰值加速度作用下 地基震陷的破坏概率,以渭河二级阶地为例。由表 4 可 知,在地震波1的作用下,该地基土体在地震波峰值加速度为0.1g~0.7g时均会出现完好概率,在地震波2 和地震波3的作用下,在峰值加速度分别达到0.4g及以后和0.3g及以后完好概率均为0。

表 4 不同地震波作用下地基震陷完好概率 Table 4 Probability of intact seismic subsidence of foundation under different seismic wave effects

加速度/g	地震波1	地震波2	地震波3
0.1	0.946	0.854	0.842
0.2	0.392	0.094	0.832
0.3	0.238	0.004	0
0.4	0.01	0	0
0.5	0.018	0	0
0.6	0.012	0	0
0.7	0.002	0	0

依据式(8)求得最小可靠度指标,图 6 为在不同地 震波作用下地基震陷的最小可靠度随峰值加速度的变 化规律,最小可靠度指标的变化范围为-2.878~1.607。 从整体来说,随着地震峰值加速度的增大,地基在地震 作用下的最小可靠度指标逐渐降低。当地震峰值加速 度为 0.1g 时,震陷最小可靠度较高,都为正值;当地震 峰值加速度为 0.2g 时,地震最小可靠度显著减小,且超 过 0.2g 以后最小可靠度均为负值。



图 6 可靠度分析获得的地基震陷的最小可靠度指标 Fig. 6 Minimum reliability index of foundation seismic subsidence obtained from reliability analysis

(3)变异系数对震陷可靠度的影响

为了更好地分析随机变量的变异性大小对震陷可 靠度的影响,本文计算了各变量在不同变异系数组合情 况下,四种土体参数变异系数随地基震陷可靠度的变化 情况,工况组合见表 5。

计算结果如图 7 所示。由图可知,随各参数变异系数的增加,震陷最大可靠度逐渐减小,而最小可靠度逐渐增大。当*COV*(ρ)从 0.01 增加至 0.2,相应的β_d从 3.72

parameter						
<u>-</u> - भा	COV					
上优	密度	弹性模量	黏聚力	摩擦角		
1-1	0.01					
1-2	0.05					
1-3	0.1	0.3	0.2	0.3		
1-4	0.15					
1-5	0.2					
2-1		0.05				
2-2		0.1				
2-3	0.05	0.2	0.2	0.3		
2-4		0.3				
2-5		0.4				
3-1			0.05			
3-2			0.1			
3-3	0.05	0.3	0.2	0.3		
3-4			0.3			
3-5			0.4			
4-1				0.1		
4-2				0.2		
4-3	0.05	0.3	0.2	0.3		
4-4				0.4		
4-5				0.5		

表 5 各参数变异系数工况组合表 Table 5 Combination table of variation coefficient for each

减小至 3.05,最小可靠度(β_h)从-1.72 增加至-1.55,降 幅为 21.97%,增幅为 10.96%;当 $COV(E_s)$ 从 0.05 增加 至 0.4,相应的 β_d 从 3.89降至 3.29, β_h 从-1.89增加至 -1.64,降幅为 18.24%,增幅为 15.24%;当COV(c)从 0.05增加至 0.4, β_d 从 4.26降至 2.89, β_h 从-1.81增加至 -1.60,降幅为 47.40%,增幅为 13.13%;当 $COV(\varphi)$ 从 0.1增加至 0.5, β_d 从 3.72降至 2.74, β_h 从-1.99增加至 -1.63,降幅为 35.77%,增幅为 22.09%。对比数据,在同 样的增幅下,最大可靠度的变化幅度比最小可靠度的变 化幅度大说明最大可靠度对变异系数更为敏感。计算 各个参数最大可靠度起末两点斜率的绝对值,分别为 3.526、1.714、3.914和 2.45,可看出黏聚力变异系数对 震陷最大可靠度影响更为显著。

4 结论

(1)Kriging 代理模型可以在小样本抽样的情况下 得到较好的近似拟合效果,达到精度要求,提高了震陷 可靠度的计算效率。

(2)采用震陷可靠度方法来评价地基土体的震陷 性,能够合理地考虑土性参数的变异性,更加符合实际 情况,具有更好的可靠性和适用性,对于已知地震波峰 值加速度,可以快速粗略估计地基震陷的破坏概率,而 不是单纯的以震陷量来评价,这在风险评估中具有更为 重要的意义。



Fig. 7 The influence of different parameter coefficient of variations on seismic subsidence reliability

(3)综合 4 种土体参数的变异系数对震陷可靠度的 影响可以发现,最大可靠度对各个参数的变异系数更为 敏感,此外四种土体参数中黏聚力的变异系数对震陷最 大可靠度的影响更为显著。

参考文献(References):

- [1] 何晓,王伟志,徐永福,等.临近既有铁路增建新线地基处理施工影响比较分析[J].水文地质工程地质,2024,51(1):111-122.[HE Xiao, WANG Weizhi, XU Yongfu, et al. Comparison analysis of the impact of soft ground improvement construction on existing railways near newly constructed lines [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1):111-122.(in Chinese with English abstract)]
- [2] 屈宏录,刘德仁,孙英萍,等.深厚黄土地基浸水湿陷变形及竖向土压力作用分析[J].水文地质工程地质,2022,49(4):157-164. [QU Honglu, LIU Deren, SUN Yingping, et al. Analysis of collapsible deformation and vertical soil pressure action of thick loess foundation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4):157-164. (in Chinese with English abstract)]

- [3] 郭乐,王家鼎,谷天峰.宝鸡市渭北台塬马兰黄土震陷 特性研究[J].水文地质工程地质,2012,39(2):6165. [GUO Le, WANG Jiading, GU Tianfeng. A study of loess seismic subsidence of tableland to the North Weihe River in Baoji City [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(2):61-65. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 吴志坚,张泽忠,王平,等.甘南地区黄土残余应变特征研究和震陷灾害区划[J].岩土工程学报,2013,35(增刊1):113-117. [WU Zhijian, ZHANG Zezhong, WANG Ping, et al. Study on residual strain characteristics of loess in Gannan Area and earthquake subsidence disaster zoning [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup 1):113-117. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘少鹏.强震作用下黄土场地的震陷评价——以富平县为例[D].西安:长安大学,2020.[LIU Shaopeng. Seismic subsidence evaluation of loess site under strong earthquake: A case study of Fuping County[D]. Xi'an: Changan University, 2020.(in Chinese with English abstract)]
- [6] 王峻,王兰民,李兰.黄土场地震陷量的试验预测[J].西 北地震学报,1997,19(2):62-66. [WANG Jun, WANG Lanmin, LI Lan. Experimental prediction of earthquake

subsidence in loess field [J]. China Earthquake Engineering Journal, 1997, 19(2): 62 - 66. (in Chinese with English abstract)]

- [7] 刘辉,郑俊杰,章荣军.考虑不排水抗剪强度空间变异 性的黏土边坡系统失效概率分析[J].岩土力学,2021, 42(6):1529-1539. [LIU Hui, ZHENG Junjie, ZHANG Rongjun. System failure probability analysis of cohesive slope considering the spatial variability of undrained shear strength [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6):1529-1539. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 程井,何子瑶,刘忠,等.基于非线性随机有限元的堤坝 边坡可靠度分析[J].人民黄河,2023,45(5):137-142.
 [CHENG Jing, HE Ziyao, LIU Zhong, et al. Analysis of embankment slope safety based on nonlinear stochastic finite element method [J]. Yellow River, 2023, 45(5):137-142.
 (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘栗昊, 缪林昌. 基于联合灰色关联分析的土质边坡稳定性预测[J].公路交通科技, 2022, 39(10): 32-39. [LIU Lihao, MIAO Linchang. Prediction of soil slope stability based on conjoint grey correlation analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(10): 32-39. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 曹泽鑫.基于随机模糊可靠度理论的边坡稳定性评价及应用[D].武汉:武汉工程大学,2020.[CAOZexin.Evaluation and application of slope stability based on stochastic fuzzy reliability theory [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 丁卫锋.引汉济渭二期工程沿线黄土湿陷性评价研究 [D].西安:西安科技大学,2020. [DING Weifeng. Study on evaluation of loess collapsibility along the second phase of the project of diverting water from Han to Wei [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李波,崔金涛,刘念,等.考虑指标关联分析的软土地基 震陷判别逐步判别模型[J].建筑科学,2019,35(7): 30 - 36. [LI Bo, CUI Jintao, LIU Nian, et al. Stepwise discriminant analysis for subsidence discrimination of foundation in soft clay area considering indicators relational analysis [J]. Building Science, 2019, 35(7): 30 - 36. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 谭芳.基于参数等级划分模糊处理的黄土震陷灾害概率 分析[D].西安:西安建筑科技大学,2010.[TAN Fang. Probability analysis of loess seismic subsidence based on fuzzy

processing of the parameter rank division [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)]

- [14] 任森,邓龙胜,范文,等.陕西富平黄土震陷特性及震陷 小区划[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(4):
 134-143. [REN Sen, DENG Longsheng, FAN Wen, et al. Characteristics of loess seismic subsidence and corresponding micro-zonation for the Fuping Country, Shaanxi [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 134-143. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 孙军杰,田文通,徐舜华,等.概率性分析在黄土场地动 力沉降评价中的应用[J].岩土力学,2013,34(8):2158-2164. [SUN Junjie, TIAN Wentong, XU Shunhua, et al. Application of probability analysis method to quantitative evaluation of dynamic settlements of natural loess field [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2158 - 2164. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 赵文博,曹佳文,郭长宝,等.甘肃岷县阳坡村大型古滑坡 发育特征与稳定性评价[J/OL].地质通报,2024(2024-08-05)[2024-09-06] [ZHAO Wenbo, CAO Jiawen, GUO Changbao, et al. Developmental characteristics and stability simulation of Yangpo Village large-scale ancient landslides in Minxian County, Gansu Province, China [J/OL]. Geological Bulletin of China, 2024(2024-08-05)[2024-09-06]. https://kns. cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20240802.1808.003.html. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 吴玮江,王国亚,张国信,等.甘肃岷县永光1#流滑型黄 土滑坡的远程滑动特征[J].中国地质灾害与防治学 报,2023,34(6):3-12. [WU Weijiang, WANG Guoya, ZHANG Guoxin, et al. Long-runout characteristics of the Yongguang 1# loess flowslide in Minxian County, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 3 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 薛强,张茂省,董英,等.基于 DEM 和遥感的黄土地质灾害精细化风险识别——以陕北黄土高原区米脂县为例
 [J].中国地质,2023,50(3):926-942. [XUE Qiang,ZHANG Maosheng, DONG Ying, et al. Refinement risk identification of loess geo-hazards based on DEM and remote sensing: Taking Mizhi County in the Loess Plateau of northern Shaanxi as an example [J]. Geology in China, 2023, 50(3): 926-942. (in Chinese with English abstract)]