doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20249057

考虑随机场的大跨度斜拉桥可靠度分析方法

程 进[1,2]，孙克荻[1]

（1. 同济大学 桥梁工程系，上海 200092；2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室，上海 200092）

摘 要：为研究实际工程中参数随机性及其空间变异和相关性，结合随机场理论与可靠度理论，提出一种考虑随机场的大跨度斜拉桥可靠度分析方法，并通过算例验证其准确性和适用性. 考虑桩土相互作用，将该方法应用于苏通长江公路大桥进行可靠度和参数敏感性分析. 结果表明：该方法适用于大跨度斜拉桥的可靠度分析，桩土相互作用对可靠度指标影响较小；忽略参数随机性及其空间变异和相关性会低估结构在正常使用极限状态下的可靠度. 斜拉桥可靠度指标对跨中段主梁截面积、汽车荷载均值与标准差最为敏感，改变汽车荷载变异系数和随机场相关长度会对可靠度指标产生影响.

关 键 词：斜拉桥；随机场；一次二阶矩法；有限元分析；可靠度指标

中图分类号：U 448.27 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)03-0110-10

Reliability Analysis Method of Long-Span Cable-Stayed Bridges Considering Random Fields

CHENG Jin[1,2], *SUN Ke-di*[1]

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China. Corresponding author: CHENG Jin, E-mail: chengjin@tongji.edu.cn)

Abstract: To study the parameter randomness and their spatial variability and correlation in practical engineering, a reliability analysis method of long-span cable-stayed bridges considering random fields was proposed by combining random field theory and reliability theory. The accuracy and applicability of the method were verified through case studies. Considering pile-soil interaction, the method was applied to the Sutong Yangtze River Highway Bridge for reliability and parameter sensitivity analysis. The results indicate that the method is applicable to the reliability analysis of long-span cable-stayed bridges. The influence of pile-soil interaction on the reliability index is small. Neglecting the parameter randomness and their spatial variability and correlation can underestimate the structural reliability under normal service limit states. The reliability index of cable-stayed bridges is most sensitive to the cross-sectional area of the main girder in the mid-span segment, and the mean value and standard deviation of the vehicle load. Changes in the vehicle load variation coefficient and the random field correlation length can affect the reliability index.

Key words: cable-stayed bridge; random field; first-order second-moment method; finite element analysis; reliability index

斜拉桥造型美观、结构轻柔，具有卓越的跨越能力. 随着大跨度桥梁向着轻盈化的方向发展，其功能和结构形式变得更加多元，对其进行安全评估至关重要.

随着随机场理论的发展，部分学者将其引入结构可靠度评估领域. Zhu等[1]结合随机场理论与极限平衡法，对海底边坡的可靠度进行了评估. Mensah等[2]提出了基于随机场的可靠性框架，用代理模型表示腐蚀碳钢管道的失效模式，实现了结构的时变可靠性估计. 杨周等[3]运用随

收稿日期：2024-11-22
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFB1600300).
作者简介：程 进(1971—)，男，上海人，同济大学研究员，博士生导师.
通信作者：程 进，E-mail：chengjin@tongji.edu.cn.

机摄动理论和四阶矩技术给出了机械构件动态可靠性灵敏度的求解公式.Aswathy等[4]提出了一种考虑对数正态分布随机场的随机无网格方法用于结构可靠度估计.尹平保等[5]采用随机响应面法构建了斜坡地形桩基的极限状态函数,利用一次二阶矩法计算其可靠度.Ibrahim等[6]考虑材料性能的空间变异性对高层建筑关键构件进行了随机分析和可靠度评估.

在斜拉桥的可靠度评估方面,Florian等[7]基于曲线拟合与抽样方法,考虑参数的不确定性,在正常使用极限状态下评估了某斜拉桥的可靠度.Bruneau等[8]评估了系统可靠度分析方法的实用性,实现了对斜拉桥在承载能力极限状态下的全局失效行为的初步了解.Zhou等[9]综合考虑了交通荷载和风荷载,对某大跨度斜拉桥的承载能力极限状态建立了整体可靠度评估框架.白冰[10]将支持向量分类(support vector classification,SVC)算法和拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling,LHS)迁移策略等方法引入系统可靠度理论,研究了某大跨斜拉桥在施工期的系统可靠度.Tonyali等[11]以美国某斜拉桥为例,研究了其在空间变化的地震作用、局部土体和波速变化情况下的随机响应.Mao等[12]采用概率密度演化方法研究了列车-斜拉桥相互作用体系的地震随机动力行为.Han等[13]考虑桩土相互作用和风浪-水流随机作用,对跨海大跨度斜拉桥进行了动力响应分析.

综上,针对随机场理论和斜拉桥可靠度评估的研究,国内外均已取得了诸多成果.然而,大跨度斜拉桥的材料特性、尺寸、荷载等参数呈现出明显的随机性,且在空间上存在变异性和相关性,特别是在考虑桩土相互作用时,这种不确定性更加显著[14-17].本文将随机场理论引入斜拉桥可靠度评估领域,提出了一种考虑随机场的大跨度斜拉桥可靠度分析方法,并说明了实现流程,编制了相应程序,通过经典算例验证了方法与程序的准确性,最后在工程实例中进行了结构可靠度分析与参数敏感性分析,获得了良好效果.

1　考虑随机场的大跨度斜拉桥可靠度分析方法

结合随机场理论与可靠度理论,提出了一种考虑随机场的大跨度斜拉桥可靠度分析方法,主要包括随机场离散、有限元分析和可靠度指标计算.

1.1　随机场离散

为了描述连续介质力学特性的空间变异性以及荷载的随机分布特征,可以用有限数量且具有相关性的随机变量来表示,即随机场的离散.在各种随机场离散方法中,中心点法能较好地处理多种相关函数且便于编程实现,在工程中具有实际意义.本文采用中心点法对随机场进行离散.该方法用$\{\Omega_e^t, t=1,\cdots,M\}$中点处$x_M^t$的$H(x_M^t)$值表示$\Omega_e$内各点的$H(x)$值.以模拟桩土相互作用涉及的地基反应模量为例,中心点法离散在有限元计算中的示意图如图1所示.

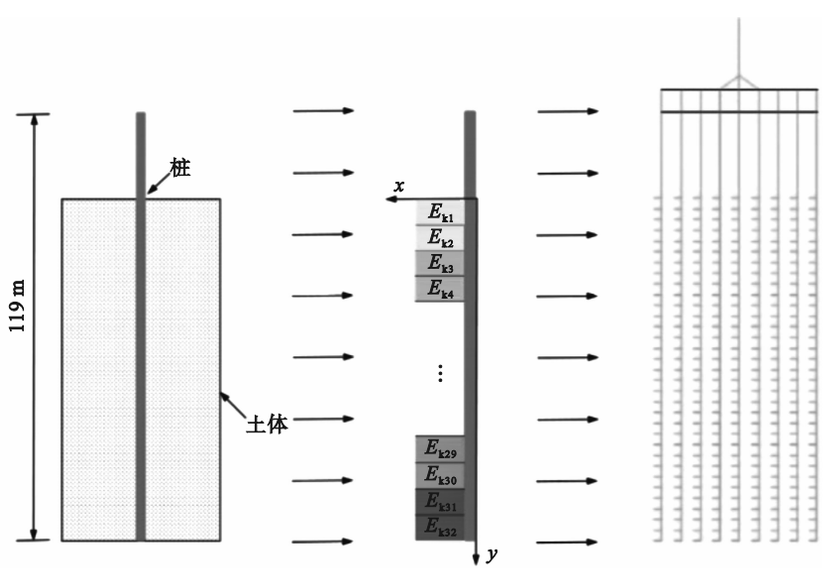


图1　中心点法示意图

Fig. 1　Schematic diagram of center point method

沿群桩竖向将地基反应模量E_k随机场离散，y方向平均划分为若干随机场单元E_{ki}(i=1,2,…,32).随机场离散网格编号与随机变量相对应，并将网格信息赋予有限元模型相应单元.各随机变量间的相关性采用相关模型加以考虑.

1.2 有限元分析

大跨度斜拉桥的结构、荷载及边界条件均比较复杂，故通过ANSYS命令流参数化建立结构有限元模型进行分析.将连续体离散化后构建单元平衡方程，单元材料特性和荷载等用随机变量表示，变量值的赋予通过Matlab平台完成.结合节点平衡或协调条件，叠加组合不同单元特性，构成整体结构的平衡方程：

$$\boldsymbol{K}(x)\cdot\boldsymbol{U}(x)=\boldsymbol{F}(x). \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{K}(x)$为结构刚度矩阵；$\boldsymbol{U}(x)$为位移矩阵；$\boldsymbol{F}(x)$为荷载矩阵.

1.3 可靠度指标计算

一次可靠性方法(first-order reliability method，FORM)能够近似估算单一极限状态的结构失效概率，具有较高精度，且只用到随机变量的均值和方差，效率较高[8].本文采用FORM中的设计验算点法(JC法)，通过数学优化算法计算可靠度指标β，该优化问题为

$$\left.\begin{aligned}&\text{目标函数：}\ \beta=\min|\boldsymbol{X}'|,\\&\text{约束函数：}\ G(\boldsymbol{X}')=0.\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{X}'$为标准正态随机变量向量.

若极限状态方程中随机变量不服从正态分布，则需将非正态随机变量X_i当量正态化，当量正态化的条件为

$$F_{X_i'}(x_i^*)=F_{X_i}(x_i^*), \tag{3}$$

$$f_{X_i'}(x_i^*)=f_{X_i}(x_i^*). \tag{4}$$

式中：$F(\cdot)$和$f(\cdot)$分别为累积分布函数和概率密度函数；X_i'为当量正态变量；x_i^*为设计验算点.

1.4 实施过程

考虑随机场的大跨度斜拉桥可靠度分析方法的实施过程：

1) 确定随机场类型及相关函数，使用中心点法将其离散为多个随机变量，对非正态随机变量进行当量正态化处理；

2) 建立极限状态方程，假定各变量初值，通常可取其均值；

3) 建立大跨度斜拉桥有限元模型，将随机变量初始值作为模型参数输入；

4) 将结构有限元模型返回的响应值代入极限状态方程，使用JC法求解可靠度指标β；

5) 判断是否收敛，若收敛则输出可靠度指标β，否则继续执行步骤2)~5).

2 程序编制及算例验证

基于前述方法，编制了考虑随机场的结构可靠度分析程序，实现了Matlab与ANSYS平台的有机结合，并通过算例验证了程序的准确性和有效性.算例1为不考虑随机场的门式框架；算例2为考虑非高斯随机场的均布荷载作用下的两端固结梁.

2.1 算例1：门式框架结构

图2为一门式框架结构，构件截面积A_i和水平作用力P为随机变量，统计特性见表1.构件截面惯性矩$I_i=\alpha_i A_i^2$(i=1,2;α_1=0.083 33;α_2=0.166 70).弹性模量$E=2.0\times10^6$ kN/m^2.

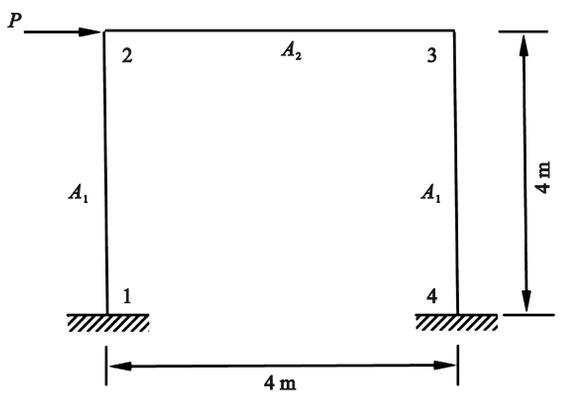


图2 门式框架计算简图

Fig. 2 Portal frame calculation diagram

表1 算例1随机变量统计特性

Table 1 Statistical characteristics of random variables of case 1

随机变量	均值	标准差	分布类型
A_1/m^2	0.36	0.036	对数正态
A_2/m^2	0.18	0.018	对数正态
P/kN	20	5.0	极值-I型

构建极限状态方程，选取节点3水平位移u_3作为结构需要控制的最大变形量：

$$g(A_1,A_2,P)=[u]-u_3=0.01-u_3. \tag{5}$$

式中，$[u]$为规范允许的最大水平位移，此处取$[u]$=0.01 m.

本文方法所得结果与文献[18]参考值的对比见表2，相对偏差较小，说明该方法适用于隐式极限状态方程的可靠度分析，计算结果准确，满足工程要求.

表2　算例1计算结果对比

Table 2　Case 1 calculation result comparison

计算结果	可靠度指标β	失效概率P_f
本文结果	2.842 4	2.24×10^{-3}
文献[18]	2.840 5	2.25×10^{-3}
相对偏差/%	0.067	−0.444

2.2　算例2:考虑非高斯随机场的均布荷载作用下的两端固结梁

图3为一均布荷载作用下的两端固结梁(L=20 m),截面弯曲刚度因结构受损而具有随机性,故考虑荷载及截面弯曲刚度为随机场.弹性模量$E(x)$服从高斯分布,截面惯性矩$I(x)$和均布荷载$Q(x)$服从非高斯分布.各随机场间互不相关,统计特性见表3.

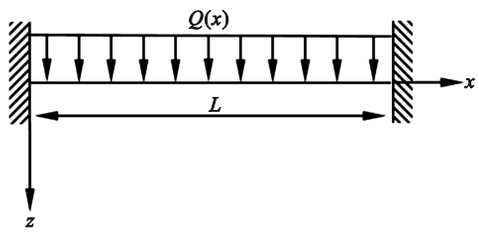


图3　均布荷载固结梁

Fig. 3　Fixed beam under uniformly distributed load

表3　算例2随机场统计特性

Table 3　Statistical characteristics of random field of case 2

随机场	均值	变异系数	分布类型	相关长度	相关模型
$E(x)$/(kN·m^{-2})	1.0×10^4	0.01	正态分布	0.5L	指数型
$I(x)$/m^4	0.666 7	0.01	对数正态	0.5L	指数型
$Q(x)$/(kN·m^{-1})	1	0.01	极值-I型	0.5L	指数型

随机场两点间相关系数$\rho(x_1,x_2)$的表达式为

$$\rho(x_1,x_2)=\exp\left(-\frac{2|x_1-x_2|}{d}\right). \tag{6}$$

式中:d为相关长度,取d=0.5L=10 m;x_1,x_2表示随机场中的空间坐标.

将固结梁的跨中挠度作为需控制的结构最大变形,建立极限状态方程:

$$g[E(x),I(x),Q(x)]=65.62-u. \tag{7}$$

式中,u为跨中挠度,mm.

本文方法所得结果与蒙特卡罗重要抽样法的模拟结果见表4.蒙特卡罗法模拟次数为10 000次,精度(即失效概率的变异系数δ_{p_f})已趋于收敛.采用本文方法所得结果与蒙特卡罗模拟结果差异较小,说明本文方法适用于考虑随机场的结构可靠度分析,结果准确,满足工程要求.

表4　算例2计算结果对比

Table 4　Case 2 calculation result comparison

随机场离散单元数	本文方法	蒙特卡罗法	相对偏差/%
20	3.804	3.695	2.950

3　工程应用

3.1　工程概况

苏通长江公路大桥(以下简称苏通大桥)为双塔双索面体系斜拉桥,全长32.4 km,桥跨布置形式为2×100 m+300 m+1 088 m+300 m+2×100 m,如图4所示.索塔采用倒Y形双塔柱混凝土桥塔,高度300 m.拉索布置采用扇形索面形式,标准索距16 m,每扇面共34对索.主梁采用封闭钢箱梁,梁高3.5 m、宽35.4 m.苏通大桥下部结构采用高桩承台群桩基础,如图5所示.钻孔灌注桩共131根,长117 m,基础桩直径2.8 m,采用梅花形布桩,桩基自由段长度20 m(至地面线).

3.2　桩土相互作用模拟

p-y曲线法可以综合考虑土体非线性、桩的刚度和荷载特性等因素进行弹塑性分析,更符合土体的实际性状[19],故本文采用该方法模拟桩土相互作用.图6为典型p-y曲线及弹塑性简化模型,图7为单桩土弹簧布置图.

3.3　概率分析模型

3.3.1　随机场、随机变量与相关模型

选取苏通大桥随机场为主梁弹性模量E_1、截面惯性矩I_1和截面积A_1,桥塔弹性模量E_2和密度ρ_2,地基反应模量E_k以及汽车荷载Q;随机变量为斜拉索弹性模量E_3、材料密度ρ_3,群桩弹性模量E_4和单桩直径D_i.随机场相关模型为指数型,相关长度d取0.25L(L为随机场空间长度),各随机场间互不相关.苏通大桥随机场和随机变量统计特性见表5、表6.

3.3.2　有限元模型

依托ANSYS构建考虑桩土相互作用的苏通大桥有限元模型如图8所示.桥塔、主梁和群桩单元选用BEAM4,拉索单元选用LINK10,承台单元选用SHELL63.辅助墩和群桩底部固结,桩土

间的相互作用选用COMBIN14弹簧单元模拟,其刚度用简化p-y曲线法计算.

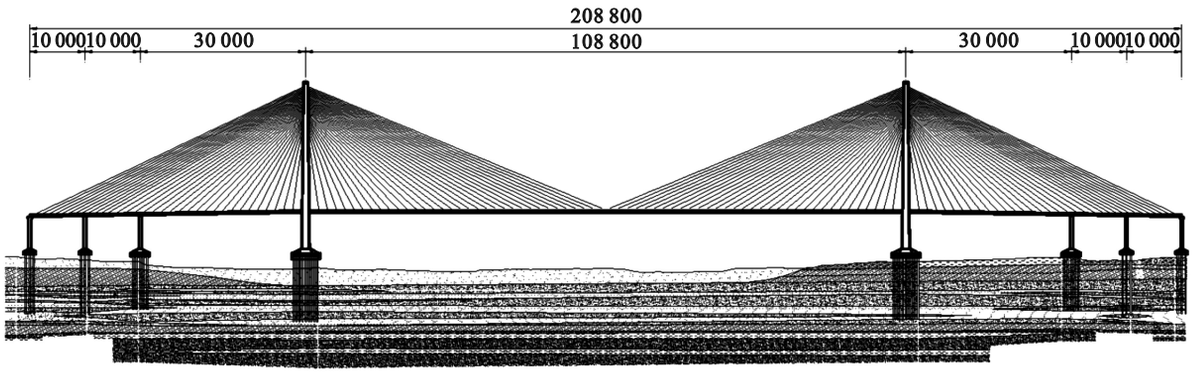


图4 苏通大桥总体布置(单位:cm)

Fig. 4 General layout of Sutong Bridge (unit:cm)

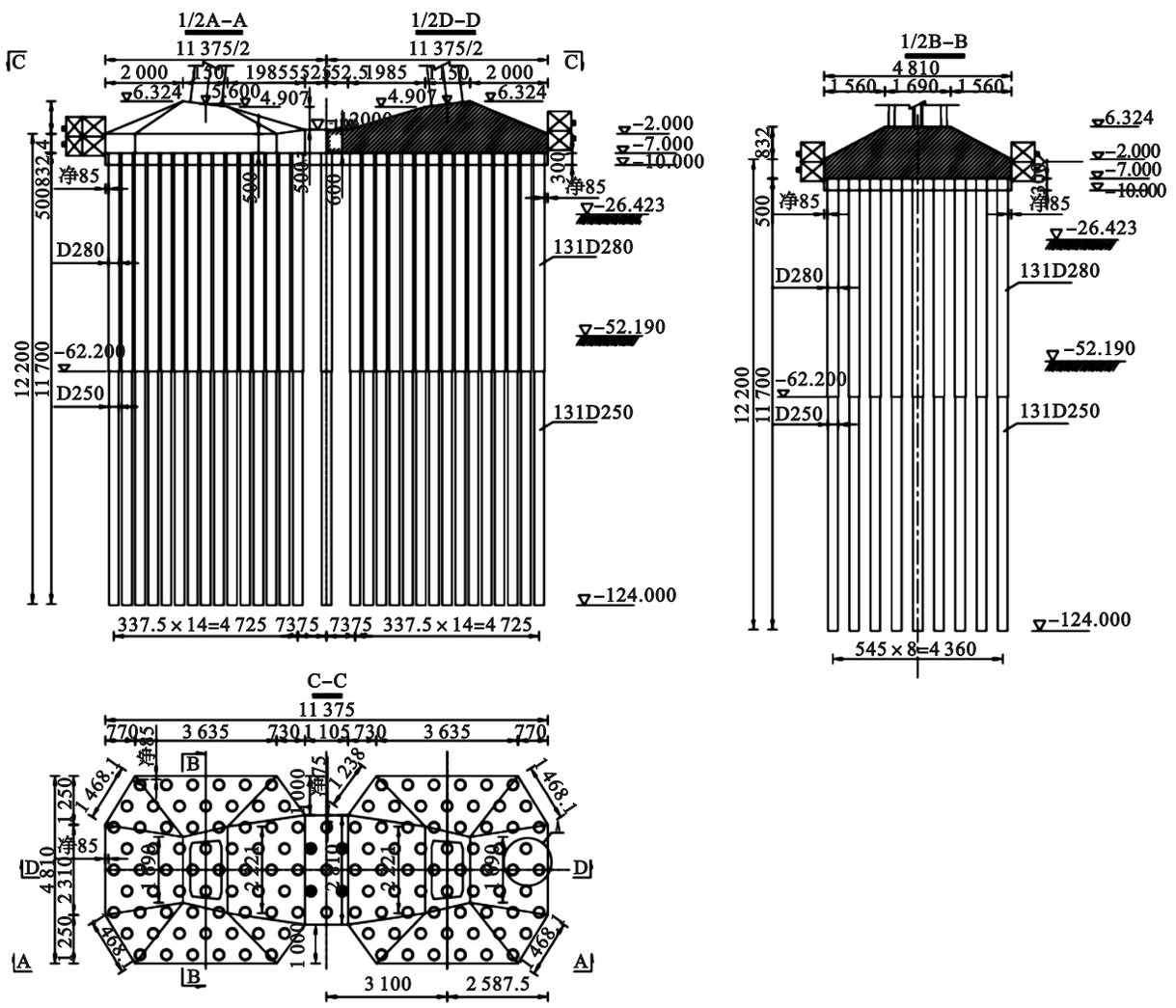


图5 苏通大桥群桩基础构造和平面布置(高程单位:m,尺寸单位:cm)

Fig. 5 Pile group foundation structure and plan layout of Sutong Bridge (elevation unit:m, dimension unit:cm)

3.4 可靠度指标计算

3.4.1 随机场离散

设地基反应模量随机场均值μ_{E_k},变异系数δ_{E_k},将地基反应模量随机场离散化,沿竖向划分为32个随机变量(编号E_{k1}~E_{k32}),各变量对应土层厚度为96/32=3 m.各随机变量的离散情况如表7所示.

各随机变量的基本信息表达式:

$$\mu_{E_{ki}}=\mu_{E_k},i=1,2,\cdots,32, \tag{8}$$

$$\delta_{E_{ki}}=\delta_{E_k},i=1,2,\cdots,32, \tag{9}$$

$$C_{ij}=\exp\left(\frac{-2\left|y_i-y_j\right|}{d}\right). \tag{10}$$

式中:$\mu_{E_{ki}}$和$\delta_{E_{ki}}$为第i个随机场单元对应随机变量的均值和变异系数;μ_{E_k}和δ_{E_k}为随机场分布参数:均值和变异系数;C_{ij}为随机场相关矩阵元素;y_i,y_j为第i,j个随机场单元中心点空间位置的y轴坐标;d为随机场相关长度,取值见表5.

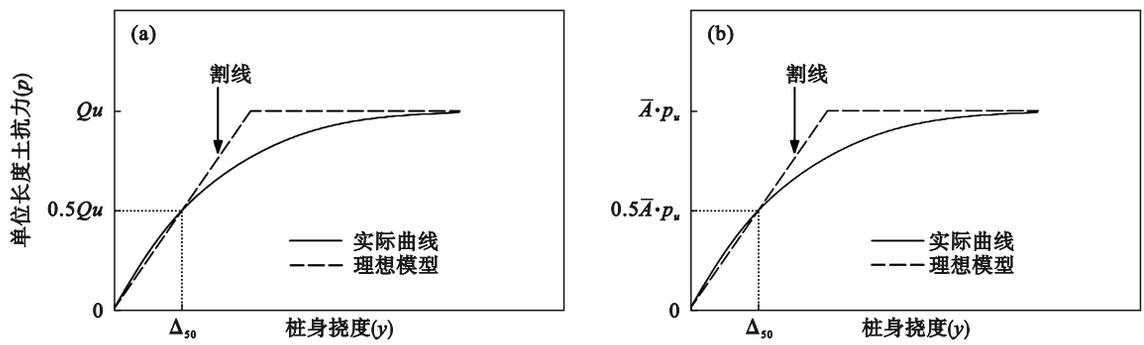


图6　典型p–y曲线及弹塑性简化模型

Fig. 6　Typical p–y curves and elastoplastic simplified model

(a)—黏性土;(b)—砂性土.

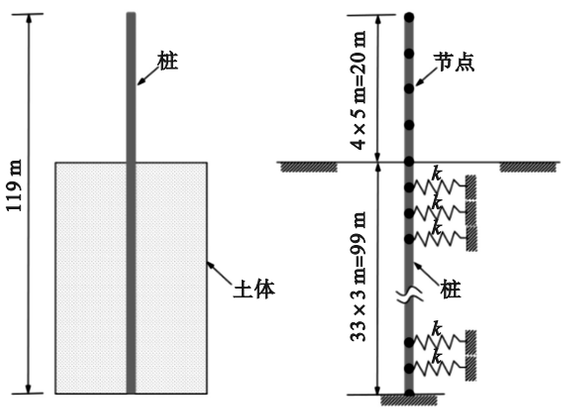


图7　土弹簧布置示意图

Fig. 7　Schematic diagram of soil spring layout

3.4.2　极限状态方程建立

本文考虑结构在正常使用极限状态下跨中挠度是否满足规范要求.根据《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01—2020),不计冲击力,汽车荷载作用下钢梁允许的竖向挠度最大值为计算跨径的1/400,即$[u]=L/400=1\,088/400=2.72$ m,据此构建极限状态方程:

$$Z=[u]-u_v=2.72-u_v, \tag{11}$$

式中:$[u]$是规范允许的最大挠度;u_v为主梁最大挠度.

3.4.3　可靠度指标计算

表8为划分的3种不同工况.在正常使用极限状态下,采用本文方法计算苏通大桥的结构可靠度及失效概率.工况1考虑随机场和桩土相互作用;工况2只考虑随机场;工况3只考虑桩土相互作用.

表5　苏通大桥随机场统计特性

Table 5　Statistical characteristics of random field of Sutong Bridge

随机场变量	均值	变异系数	分布类型	来源	相关模型	相关长度
主梁弹性模量E_1/GPa	210	0.10	正态分布	—	指数型	0.25L
主梁惯性矩I_1/m^4	4.698~7.291	0.05	对数正态分布	文献[20]	指数型	0.25L
主梁横截面积A_1/m^2	1.719~2.537	0.05	对数正态分布	—	指数型	0.25L
桥塔弹性模量E_2/GPa	35.0	0.10	正态分布	—	指数型	0.25L
桥塔密度ρ_2/(kg·m^{-3})	2 600	0.05	正态分布	—	指数型	0.25L
地基反应模量E_k/(kN·m^{-3})	1.63×104	0.20	正态分布	文献[21]	指数型	0.25L
汽车荷载Q/(kN·m^{-1})	46.2	0.20	正态分布	文献[22]	指数型	0.25L

以工况1为例,采用本文方法所得结果与蒙特卡罗模拟结果对比如表9所示.蒙特卡罗重要抽样法模拟次数为5 000次,其精度(即失效概率的变异系数δ_{p_f})已趋于收敛.

表10为3种工况下的可靠度指标与结构失效概率,可靠度指标绘制如图9所示.表10中,相对差值的计算公式为$\left|\left(\beta_i-\beta_1\right)/\beta_1\right|\times100\%$,$i$=1,2,3,其中$\beta_1$是按表8中工况1得到的可靠度指标.

表6 苏通大桥随机变量统计特性

Table 6 Statistical characteristics of random variables of Sutong Bridge

随机变量	均值	变异系数	分布类型	来源
斜拉索弹性模量E_3/GPa	195	0.10	正态分布	文献[20]
斜拉索密度ρ_3/(kg·m^{-3})	7 850	0.05	正态分布	文献[20]
单桩直径D_1/m	2.8	0.017	对数正态	文献[23]
单桩直径D_2/m	2.5	0.017	对数正态	文献[21]
群桩弹性模量E_4/GPa	31.5	0.10	正态分布	文献[21]

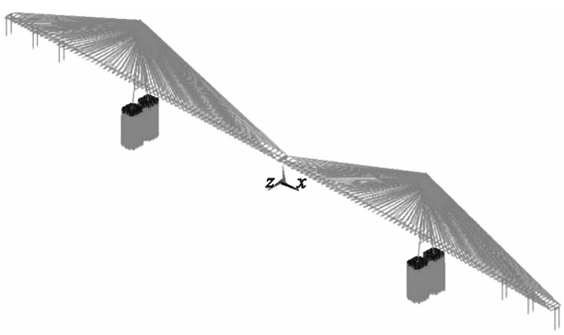


图8 苏通大桥有限元模型

Fig. 8 Finite element model of Sutong Bridge

由表9、表10和图9可知：

1）本文方法所得结果与蒙特卡罗模拟结果吻合较好，说明该方法计算结果可靠，可用于大跨度斜拉桥结构的静力可靠度分析.

2）不考虑桩土相互作用的可靠度指标β_2与考虑桩土相互作用的可靠度指标β_1接近，说明桩土相互作用对大跨度斜拉桥在正常使用极限状态下的可靠度指标影响较小.

3）不考虑随机场的可靠度指标β_3小于考虑随机场的可靠度指标β_1，说明在正常使用极限状态下，随机场对大跨度斜拉桥的可靠度指标影响较大，忽略参数的随机性及其在空间上的变异性和相关性将低估结构在正常使用极限状态下的可靠度.

表7 苏通大桥随机场的离散单元及其统计特性

Table 7 Discrete elements and statistical characteristics of random field of Sutong Bridge

编号	随机变量	均值	变异系数	分布类型	相关模型
1~12	主梁弹性模量$E_{1\text{-}1}$~$E_{1\text{-}12}$/GPa	210	0.10	正态分布	指数型
13~24	主梁惯性矩$I_{1\text{-}1}$~$I_{1\text{-}12}$/m^4	4.698~7.291	0.05	对数正态	指数型
25~36	主梁横截面积$A_{1\text{-}1}$~$A_{1\text{-}12}$/m^2	1.719~2.537	0.05		指数型
37~48	桥塔弹性模量$E_{2\text{-}1}$~$E_{2\text{-}12}$/GPa	35.0	0.10		指数型
49~60	桥塔密度$\rho_{2\text{-}1}$~$\rho_{2\text{-}12}$/(kg·m^{-3})	2 600	0.05		指数型
61~94	边跨斜拉索弹性模量$E_{3a\text{-}1}$~$E_{3a\text{-}34}$/GPa	195	0.10	正态分布	—
95~128	中跨斜拉索弹性模量$E_{3j\text{-}1}$~$E_{3j\text{-}34}$/GPa	195	0.10		—
129~129	斜拉索密度$\rho_{3\text{~}1}$/(kg·m^{-3})	7 850	0.05		—
130~141	汽车荷载Q_1~Q_{12}/(kN·m^{-1})	46.2	0.20		指数型
142~143	单桩直径$D_{1a\text{-}1}$~$D_{1j\text{-}1}$/m	2.8	0.017	对数正态	—
144~145	单桩直径$D_{2a\text{-}1}$~$D_{2j\text{-}1}$/m	2.5	0.017		—
146~147	群桩弹性模量$E_{4a\text{-}1}$~$E_{4j\text{-}1}$/GPa	31.5	0.10		—
148~179	左塔地基反应模量$E_{ka\text{-}1}$~$E_{ka\text{-}32}$/(kN·m^{-3})	16 300	0.20	正态分布	指数型
180~211	右塔地基反应模量$E_{kj\text{-}1}$~$E_{kj\text{-}32}$/(kN·m^{-3})	16 300	0.20		指数型

表8 苏通大桥结构可靠度分析的3种工况

Table 8 Three working conditions for structural reliability analysis of Sutong Bridge

工况	考虑随机场	考虑桩土相互作用
工况1	√	√
工况2	√	
工况3		√

3.5 参数敏感性分析

在前文分析基础上进行参数敏感性分析，考虑的参数有：随机场的均值与标准差；汽车荷载Q的变异系数；随机场的相关长度.

3.5.1 随机场的均值与标准差

Hohenbichler等[24]给出了可靠度指标对随机变量分布参数敏感度的计算公式：

$$\frac{\partial\beta}{\partial\mu_i}\approx-\alpha_i, \tag{12}$$

$$\frac{\partial\beta}{\partial\sigma_i}\approx-\beta\alpha_i^2. \tag{13}$$

式中:β为可靠度指标;α_i为第i个随机变量的方向余弦;μ_i,σ_i分别为第i个随机变量的均值和标准差.

表9　可靠度指标计算结果对比

Table 9　Calculation result comparison of reliability index

指标	本文方法	蒙特卡罗法	相对差值/%
β	2.852	2.797	1.97

图10为采用式(12)和式(13)计算得到的苏通大桥主梁最大挠度可靠度对随机变量分布参数的敏感程度.可知苏通大桥结构可靠度对各随机变量均值的敏感程度中较大的依次是:跨中段主梁截面积$A_{1\text{-}4}$~$A_{1\text{-}7}$、跨中段汽车荷载Q_4~Q_7、中跨斜拉索弹性模量$E_{3j\text{-}1}$~$E_{3j\text{-}5}$和斜拉索密度γ_3;对随机变量标准差的敏感程度中较大的依次是:主梁截面积$A_{1\text{-}4}$~$A_{1\text{-}7}$、汽车荷载Q_4~Q_7、中跨斜拉索弹性模量$E_{3j\text{-}1}$~$E_{3j\text{-}5}$和斜拉索密度ρ_3.

表10　3种工况的可靠度指标与失效概率

Table 10　Reliability index and failure probability under three working conditions

工况	可靠度指标	失效概率	相对差值/%
工况1	2.852	2.17×10^{-3}	0
工况2	2.945	1.61×10^{-3}	3.26
工况3	1.831	3.36×10^{-2}	35.80

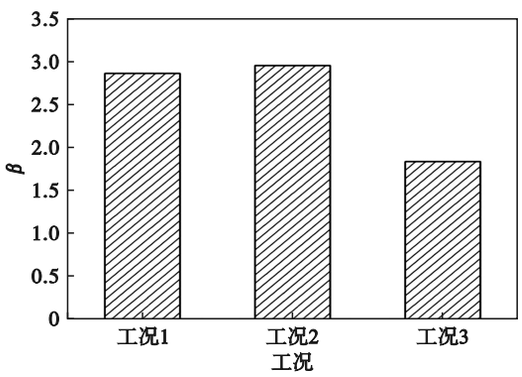


图9　苏通大桥3种工况下的可靠度指标

Fig. 9　Reliability index of Sutong Bridge under three working conditions

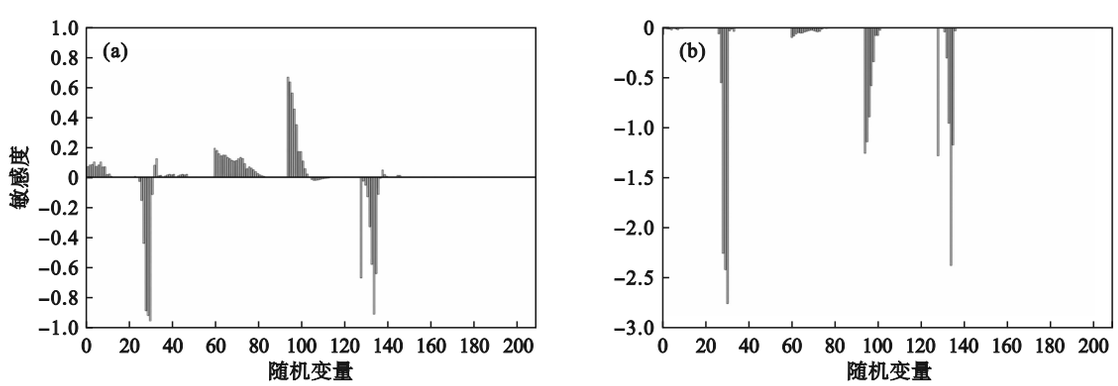


图10　可靠度指标对随机变量的敏感性

Fig. 10　Sensitivity of reliability index to random variables

(a)—均值;(b)—标准差.

3.5.2　汽车荷载Q的变异系数

表11为改变汽车荷载变异系数的5种工况,分别计算苏通大桥在正常使用极限状态下的可靠度指标,结果如图11所示.

表11　改变汽车荷载变异系数的5种工况

Table 11　Five working conditions changing vehicle load variation coefficient

汽车荷载变异系数	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
编号	1	2	3	4	5

由图11可知,随着汽车荷载变异系数的提高,结构可靠度逐渐降低.说明在正常使用极限状态下,汽车荷载的变异系数对大跨度斜拉桥的可靠度指标有一定影响,在实际应用中可根据实际汽车荷载的变异性进行统计分析确定.

3.5.3　随机场相关长度

表12为改变随机场相关长度的8种工况,分别计算苏通大桥在正常使用极限状态下的可靠度指标,结果如图12所示.

由图12可知,随着随机场相关长度的增大,可靠度指标逐渐减小.这说明在正常使用极限状态下,随机场相关长度对大跨度斜拉桥的可靠度指标存在一定影响.

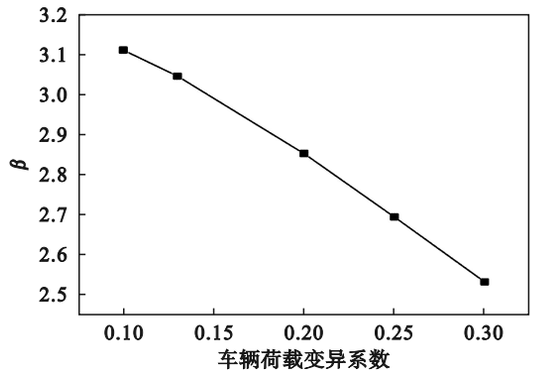


图 11 汽车荷载变异系数的参数分析

Fig. 11 Parameter analysis of vehicle load variation coefficient

表 12 改变随机场相关长度的 8 种工况

Table 12 Eight working conditions changing random field correlation lengths

编号	随机场相关长度 d/L
1	0. 15
2	0. 25
3	0. 35
4	0. 45
5	0. 55
6	0. 65
7	0. 75
8	0. 85

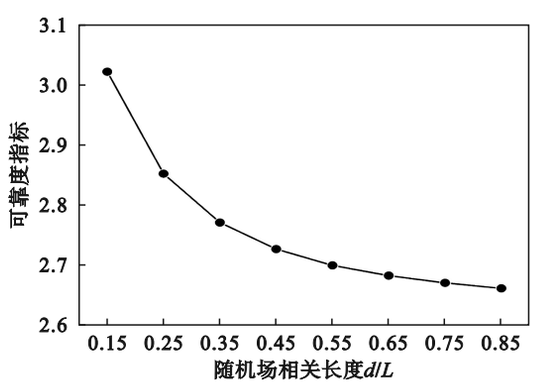


图 12 随机场相关长度的参数分析

Fig. 12 Parameter analysis of random field correlation length

4 结 论

1) 结合随机场理论与可靠度理论,提出了考虑随机场的大跨度斜拉桥可靠度分析方法,并通过若干算例验证了方法的准确性和有效性.以苏通长江公路大桥为例,将方法成功应用于斜拉桥结构静力可靠度分析中.采用本文方法所得结果与蒙特卡罗重要抽样法模拟结果吻合较好,说明该方法适用于大跨度斜拉桥结构静力可靠度分析.

2) 在正常使用极限状态下,桩土相互作用对大跨度斜拉桥的可靠度指标影响较小,而随机场对大跨度斜拉桥的可靠度指标影响较大,这说明忽略参数的随机性及其在空间上的变异性和相关性将低估结构的可靠度.

3) 在考虑随机场的大跨度斜拉桥可靠度分析基础上进行了参数敏感性分析,结果表明:可靠度指标对跨中段主梁截面积、汽车荷载的均值与标准差最为敏感.改变汽车荷载的变异系数和随机场相关长度会对大跨度斜拉桥可靠度指标产生影响.

参考文献:

[1] Zhu B, Pei H F, Yang Q. Reliability analysis of submarine slope considering the spatial variability of the sediment strength using random fields[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 86: 340-350.

[2] Mensah A, Sriramula S. Stochastic finite element-based reliability of corroded pipelines with interacting corrosion clusters[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 187: 206-220.

[3] 杨周, 郭丙帅, 张义民, 等. 基于随机载荷和强度退化的可靠性灵敏度分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 678-682, 693.
(Yang Zhou, Guo Bing-shuai, Zhang Yi-min, et al. Reliability sensitivity analysis based on random load and strength degradation[J]. *Journal of Northeastern University* (*Natural Science*), 2019, 40(5): 678-682, 693.)

[4] Aswathy M., Arun C O. An improved response function method for stochastic meshless analysis of structures with lognormally varying input stochastic fields[J]. *Computers and Structures*, 2024, 296(6):107318.

[5] 尹平保, 王杰, 张建仁, 等. 基于随机响应面法的斜坡基桩水平承载可靠性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(7): 75-82.
(Yin Ping-bao, Wang Jie, Zhang Jian-ren, et al. Reliability analysis on horizontal bearing of pile foundation in sloping ground based on random response surface method [J]. *Journal of Hunan University* (*Natural Sciences*), 2022, 49(7): 75-82.)

[6] Ibrahim A R, Makhloof D A. Stochastic analysis and reliability assessment of critical RC structural components considering material properties uncertainty[J]. *Structural Safety*, 2024, 107: 102412.

[7] Florian A, Navratil J. Reliability analysis of the cable stayed bridge in construction and service stages[C]// The 6th International Conference of Structural Safety and Reliability. Munich, 1993: 869-877.

[8] Bruneau M. Evaluation of system-reliability methods for cable-stayed bridge design [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(4): 1106-1120.

[9] Zhou Y F, Chen S R. Reliability assessment framework of the long-span cable-stayed bridge and traffic system subjected to cable breakage events[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(4): 04016133.

[10] 白冰. 大跨度钢斜拉桥施工及运营过程系统可靠度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

(Bai Bing. Study on system reliability of long-span steel cable-stayed bridge during construction and operation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.)

[11] Tonyali Z, Ates S, Adanur S. Spatially variable effects on seismic response of the cable-stayed bridges considering local soil site conditions[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2019, 70(2):143-152.

[12] Mao J F, Chen X T, Yu Z W, et al. Random dynamic analysis and running safety assessment of long-span cable-stayed bridge under high-speed trains subjected to earthquake excitations and track irregularities [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2023, 23(16):483-520.

[13] Han J Y, Zhang Z, Lu B J, et al. Dynamic response of cable-stayed bridge under wind-wave-current action considering pile-soil interaction [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2024, 20(6): 819-833.

[14] Green D K E, Douglas K, Mostyn G. The simulation and discretisation of random fields for probabilistic finite element analysis of soils using meshes of arbitrary triangular elements[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 68: 91-108.

[15] Liu L L, Cheng Y M, Zhang S H. Conditional random field reliability analysis of a cohesion-frictional slope [J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 82: 173-186.

[16] 张强强. 基于随机场理论桩基稳定可靠度研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
(Zhang Qiang-qiang. Based on the random field theory of pile foundation stability reliability research[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2016.)

[17] 陈哲衡. 大跨径PSC箱梁桥时变性能监测及状态评估[D]. 南京: 东南大学, 2018.
(Chen Zhe-heng. Time-dependent performance monitoring and condition assessment of long-span PSC box-girder bridge[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.)

[18] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
(Zhao Guo-fan. Reliability theory and its applications for engineering structures[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1996.)

[19] Dicleli M, Erhan S. Effect of soil and substructure properties on live-load distribution in integral abutment bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2008, 13(5): 527-539.

[20] Cheng J, Xiao R C. Serviceability reliability analysis of cable-stayed bridges [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2005, 20(6): 609-630.

[21] Eloseily K H. Reliability assessment of pile group in sand [D]. Maryland: University of Maryland, 1999.

[22] Wang J, Ghosn M. Hybrid data mining/genetic shredding algorithm for reliability assessment of structural systems[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(9): 1451-1460.

[23] Wang D, Chowdhury M R, Haldar A. System reliability evaluation considering strength and serviceability requirements[J]. *Computers & Structures*, 1997, 62(5): 883-896.

[24] Hohenbichler M, Rackwitz R. First-order concepts in system reliability[J]. *Structural Safety*, 1982, 1(3): 177-188.

(上接第 109 页)

[12] Guo Y, Chi S C, Mi X F, et al. Experimental investigation of statistical characteristics of elastic mechanical parameters and strength indexes of rockfill particles [J]. *Granular Matter*, 2023, 25(2): 30.

[13] 潘永泰, 李泽康, 周强, 等. 点载荷作用下煤岩颗粒断裂强度的试验研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(8): 97-101.
(Pan Yong-tai, Li Ze-kang, Zhou Qiang, et al. Experiment on fracture strength of coal and rock particles under point load[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(8): 97-101.)

[14] 张明, 卢裕杰, 杨强. 准脆性材料的破坏概率与强度尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1782-1789.
(Zhang Ming, Lu Yu-jie, Yang Qiang. Failure probability and strength size effect of quasi-brittle materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(9): 1782-1789.)

[15] Yu Z S, Lei W S, Zhai J G. A synchronized statistical characterization of size dependence and random variation of breakage strength of individual brittle particles[J]. *Powder Technology*, 2017, 317: 329-338.

[16] Jaeger J C. Failure of rocks under tensile conditions[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1967, 4(2): 219-227.

[17] 周强, 潘永泰, 朱长勇, 等. 准静态下脆性材料强度分布试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(sup2): 708-716.
(Zhou Qiang, Pan Yong-tai, Zhu Chang-yong, et al. Experimental research on strength distribution of brittle materials under quasi-static condition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(sup2): 708-716.)

[18] 邵晓泉, 迟世春, 陶勇. 堆石料剪切强度与变形的尺寸效应模拟[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1766-1772.
(Shao Xiao-quan, Chi Shi-chun, Tao Yong. Numerical simulation of size effect on shear strength and deformation behavior of rockfill materials [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(10): 1766-1772.)