

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201908047

土石混合体地基系数支持向量机模型与应用*

章 铭¹, 詹 伟², 于 洋¹, 汪 柱¹, 李兴民¹

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 针对缺乏土石混合体地基系数评价模型这一现状, 构建了基于支持向量机的土石混合体地基系数评价模型。该模型以土体弹性模量、泊松比以及块石含石率作为输入参数, 地基系数作为输出参数。为建立训练数据, 基于土石混合体弹性模量与泊松比计算模型, 建立了FLAC3D平板载荷模型开展数值实验。基于数值实验数据, 训练支持向量机模型并进行初步验证。将该支持向量机模型用于预测现场试验获得的土石混合体地基系数, 进一步验证了该模型的合理性与准确性。通过敏感性分析发现, 土体弹性模量对土石混合体地基系数的影响最大, 其次为含石率。基于支持向量机模型, 讨论了5种已有地基系数计算模型应用于土石混合体地基系数计算的可行性, 确认了可用于评估土石混合体地基系数的显式模型。

关键词: 土石混合体; 地基系数; 支持向量机; 数值模拟; 平板载荷试验

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1308-08

Foundation Coefficient Model of Soil-rock Mixture based on Support Vector Machine and Its Application

ZHANG Ming¹, ZHAN Wei², YU Yang¹, WANG Zhu¹, LI Xingmin¹

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, Hangzhou 311300, China)

Abstract: A foundation coefficient evaluation model of soil-rock mixture was established based on support vector machine (SVM). In this model, the elastic modulus of soil, Poisson's ratio of soil, and volumetric block proportion (VBP) were taken as input parameters and the foundation coefficient was taken as an output parameter. In order to establish the training data, the FLAC3D plate load model was built based on the elastic modulus and Poisson's ratio calculation model of soil-rock mixture. According to the numerical test data, the support vector machine model was trained and preliminarily verified. The support vector machine model was used to predict the foundation coefficient of soil-rock mixtures obtained from field experiments, and the rationality and accuracy of the model were further verified. Through sensitivity analysis, it could be found that the elastic modulus of soil has the greatest influence on the foundation coefficient of soil-rock mixture, followed by the volumetric block proportion. Based on the support vector machine model, the feasibility of applying the five existing founda-

* 收稿日期:2019-08-20;修回日期:2020-01-04

基金项目:自然资源部浙江地质灾害野外观测研究站开放基金项目(ZJDZGCZ-2021)、国家自然科学基金项目(41807224)、浙江省自然科学基金青年基金项目(LQ17D020001)资助

作者简介:章铭(1994—),男,硕士研究生。主要从事土石混合体力学特性研究。E-mail: fenghuazhangming@126.com

通讯作者:于洋(1986—),男,副教授。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: yang-yu@zju.edu.cn

tion coefficient calculation models to soil-rock mixture foundation coefficient calculation was discussed, and the explicit model for evaluating soil-rock mixture foundation coefficient was confirmed.

Keywords: soil-rock mixture; foundation coefficient; support vector machine; numerical simulation; plate load test

引言

土石混合物是一种分布广泛的特殊岩土介质。在实际工程建设中,不可避免地要面对工程结构物与土石混合体的相互作用问题,如浅基础与桩基础、抗滑桩和路基工程等^[1]。在计算与评价工程结构物与土石混合体相互作用时,地基系数是需要确定的重要参数之一。然而,土石混合体由土体与块石混合而成,其物理力学特性不仅与土体的性质有关,还取决于块石的含量、空间分布和休止角等因素^[2-3]。因此,土石混合体地基系数的确定方法不能简单沿用传统土力学或岩石力学方法,需要综合考虑土体与块石特性的影响,构建适用于土石混合体地基系数的评价模型,为准确评价土石混合体与结构物的相互作用提供理论依据与方法。

E.Winkler^[4]最早提出弹性地基梁理论,首次定义了地基系数。随着弹性地基梁理论的广泛应用,不同工程都面临着如何准确获取地基系数这一难题^[5]。为解决这一难题,M.A.Biot^[6]通过弹性地基梁理论与弹性连续体理论的相关性,推导了三维弹性半空间上无限梁受集中荷载作用下的解答,给出了地基系数的计算模型。A.B.Vesic^[7]将解答扩展应用于三维弹性半空间上无限梁受集中荷载和集中弯矩的情况,并提出了新的计算模型。G.G.Meyerhof等^[8-10]在前人基础上各自展开了研究,分别改进了地基系数计算模型。A.Burhan等^[11]进一步研究了地基系数和土体位移的关系,并将地基系数计算模型应用于工程实际。J.Lee等^[12]参考上述土体地基系数计算模型,开展了岩体地基系数试验研究。尽管上述地基系数的计算模型及工程应用多以土体为研究对象,但从中不难发现,影响地基系数的主要因素是土体的弹性模量与泊松比。

由此可见,确定土石混合体的地基系数首先要构建土体和块石物理力学参数与土石混合体弹性模量、泊松比的关系。在土石混合体弹性参数确定方面,Z.Hashin^[13]以内嵌刚性颗粒的弹性基质为研究对象,提出这种两相介质弹性模量和泊松比的计算模型。L.E.Vallejo等^[14]测定了黏性土与大粒径砂土颗粒混合物的超声波速,基于超声波速计算这

种混合物的弹性模量和泊松比,验证了Hashin模型的准确性。Y.Yu等^[15]基于Hashin模型推导了土石混合体 $p-y$ 曲线的初始刚度,研究了水平受荷桩与土石混合体的相互作用。M.Tsesarsky等^[16]通过有限元模型等效土石混合体,提出了土石混合体弹性模量的均质化计算模型。H.Sonmez等^[17]基于土石混合体实验数据,通过回归和神经网络构建了土石混合体弹性模量预测模型。王宇等^[18]通过将超声波测试拓宽到土石混合体研究领域,分析了含石量对土石混合体的影响。金磊等^[19]开展了一系列室内大三轴试验,对胶结土石混合体力学特性的块石含量和块石形状效应进行了分析探讨。上述关于土石混合体弹性模量与泊松比的研究,为土石混合体地基系数的计算奠定了基础。

本文在已有研究基础上,通过Hashin模型计算土石混合体弹性模量与泊松比,并将其作为输入参数,将地基系数作为输出参数建立支持向量机(support vector machine, SVM)模型。基于土石混合体地基系数实测数据较少且重复试验难度大,建立FALC3D数值模型,针对不同土体参数与含石量组合下的平板荷载数值实验,获取相应的地基系数。以数值试验数据为基础,训练并验证SVM模型。开展土石混合体平板荷载试验并搜集相关数据,验证SVM模型的合理性和准确性。在此基础上,分析土石混合体参数对地基系数的影响程度。从工程应用角度出发,评价现有地基系数计算模型应用于土石混合体的可行性。

1 土石混合体地基系数SVM模型

1.1 SVM模型

支持向量机(SVM)是一种以统计学习理论为基础、专门处理小样本情况下非线性分类和回归问题的机器学习方法,最早由C.Cortes等^[20]提出。在处理回归问题时,其基本思想是通过由核函数定义的非线性映射将低维空间非线性回归问题转换为一个高维特征空间,然后在这个高维空间中建立模型来进行回归拟合。

假设有数据集 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, m,$

$x_i \in R^n$ 为输入量, $y_i \in R^n$ 为目标值, m 为训练样本数, 则其回归函数形式为:

$$f(x_i) = \omega \cdot \phi(x_i) + b \quad (1)$$

式中, $\phi(x_i)$ 为输入向量从低维空间到高维特征空间的非线性映射; ω 、 b 为回归因子, 为模型中待确定参数。

考虑到存在拟合误差 ϵ , 引入松弛因子 $\xi_i \geq 0$ 和 $\xi_i^* \geq 0$, 上述问题转换为下列规划问题:

$$\min \frac{1}{2} \omega^T \omega + C \sum_{i=1}^M (\xi_i + \xi_i^*) \quad (2)$$

约束条件为:

$$s.t. \begin{cases} y_i - \omega \cdot \phi(x_i) - b \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \omega \cdot \phi(x_i) + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i \end{cases} \quad (3)$$

式中, $C > 0$ 为惩罚参数, 控制对超出误差 ϵ 的样本的惩罚程度, C 越大, 则惩罚越大。

为了解决该约束最优化问题, 引入拉格朗日函数, 将上述问题转化为对偶问题, 求解得:

$$f(x) = \sum_{i=1}^M (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (4)$$

式中, M 为支持向量的个数; α_i, α_i^* 为拉格朗日乘子, $\alpha_i - \alpha_i^*$ 不为零时对应的样本为支持向量; $K(x_i, x)$ 为核函数, 核函数的选取应使其为高维特征空间的一个点积。

核函数种类多样, 本文选择径向基函数 (Radial Basis Function, RBF):

$$K(x_i, x) = e^{-\gamma \|x - x_i\|} \quad (5)$$

式中, γ 为径向基函数系数, 决定径向基函数的形状。

γ 和 C 是决定 SVM 模型准确度的两个重要参数。为了提高 SVM 模型的准确度, 本文选用所有可能的 γ 、 C 组合进行参数寻优, 即建立所有 γ 、 C 组合的 SVM 模型, 并计算每种组合交叉验证时的平均相对误差。所有组合中平均相对误差最小的 SVM 模型即最优 SVM 模型。

1.2 SVM 模型训练集构建

为构建 SVM 模型的训练集, 建立 FLAC3D 数值模型开展平板荷载试验。平板荷载试验最早由 K. Terzaghi^[21] 提出, 利用 0.305 m × 0.305 m 方形平板进行压载试验, 根据测得的平板压应力—位移曲线确定地基系数。为了便于统一和比较, 我国《岩土工程勘察规范》^[22] 规定采用直径为 30 cm 的平板进行压载试验, 当平板下沉位移达到 1.25 mm 时, 测得平板上的压应力值, 并根据下式计算地基系数:

$$k = \frac{\sigma}{s} \quad (6)$$

式中, k 为地基系数; σ 为平板下沉位移 1.25 mm 对应的压应力; s 为下沉量基准值, 等于 1.25 mm。

根据上述规定, 建立如图 1 所示 FLAC3D 模型。土石混合体为 3 m × 3 m × 3 m 的立方体。平板尺寸为 0.3 m × 0.3 m, 位于土石混合体顶面中心。为了模拟加载过程, 在平板范围内的网格节点上施加沿 z 负方向的速度, 速度大小为 1.25×10^{-7} m/step。通过控制加载步使平板下沉量达到基准值 1.25 mm。计算平板范围内节点上的不平衡力之和, 将其除以加载面积即压应力 σ 。通过式 (6) 可计算该模型的地基系数。

确定网格尺寸前, 研究了不同网格尺寸对 k 的影响。如图 2 所示, 当平板范围 (0.3 m) 内单向布置 10 个网格以上时, 网格尺寸变化对计算结果的影响可忽略, 因此确定平板范围内的网格尺寸为 0.03 m, 模型共包含 7 000 个单元和 7 583 个节点。

模型的本构关系采用各向同性弹性模型, 输入参数为土石混合体的体积模量 K 、剪切模量 G 。其

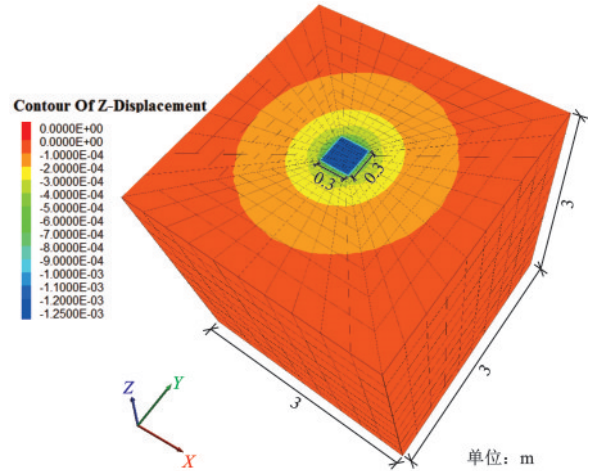


图1 FLAC3D平板荷载模型

Fig.1 FLAC3D plate load model

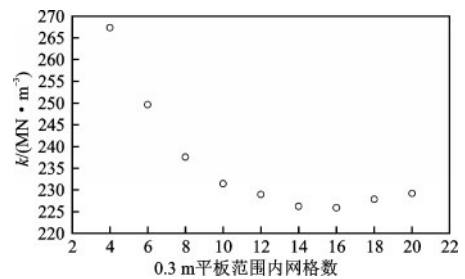


图2 平板不同网格数下的地基系数

Fig.2 Foundation coefficient under plates with different grid numbers

中 K, G 的计算公式为:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (7)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (8)$$

式中, E, μ 分别为土石混合体的弹性模量和泊松比。

为计算土石混合体弹性模量与泊松比, 引入 Hashin 模型。Z.Hashin^[13] 根据最小势能原理和最小余能原理, 提出了由弹性基质和刚性颗粒组成的复合材料弹性模量和泊松比的整体模型。对应于土石混合体, 土体和块石分别假设为弹性基质和刚性颗粒, 则土石混合体的弹性模量和泊松比可表示为:

$$\mu = \mu_m + \frac{3(1-\mu_m)(1-5\mu_m)(1-2\mu_m)}{2(4-5\mu_m)} \text{VBP} \quad (9)$$

$$\frac{E}{E_m} = 1 + \frac{3(1-\mu_m)(5\mu_m^2 - \mu_m + 3)}{(1+\mu_m)(4-5\mu_m)} \text{VBP} \quad (10)$$

式中, E_m, μ_m 分别为土石混合体中土体的弹性模量和泊松比; VBP 为土石混合体的含石率, 即土石混合体中块石的体积含量。

为生成 SVM 模型的训练集, 随机生成土体参数 E_m, μ_m 及块石含石率 VBP。表 1 为各个输入参数的上限值与下限值^[13], 假设每个参数服从均匀分布, 各参数不具有相关性(相关系数为 0), 生成 100 组输入参数。通过式(7)~(10)计算得 FLAC3D 模型的输入参数。调用 FLAC3D 模型计算正应力 σ , 并通过式(6)计算每组输入参数对应的地基系数, 形成包含 100 组数据的集合。随机抽取其中的 80 组数据作为 SVM 模型训练集, 剩余 20 组数据用于验证训练模型的精度。

表 1 土石混合体参数上下限值

Table 1 Upper and lower limits of soil-rock mixture parameters

参数值	土体弹性模量 E_m/MPa	土体泊松比 μ_m	含石率 VBP/%
上限值	10	0.15	20
下限值	50	0.35	70

1.3 模型训练与精度验证

为避免训练集中输入参数量级和单位差异对模型训练的影响, 训练集数据需进行标准化处理, 即训练集数据根据式(11)映射到 $[0, 1]$ 上。

$$y_i^* = \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (11)$$

式中, y_i 为训练集中某参数的第 i 项; y_{\max}, y_{\min} 分别为该参数的最大项与最小项; y_i^* 为标准化处理后该参数的第 i 项。

通过上述处理可大大加快 SVM 模型的寻优过程, 提高其准确性。

综上, 土石混合体地基系数 SVM 模型的流程如图 3 所示。经过 SVM 训练后的参数寻优, SVM 模型 C 的最佳取值为 4.924 6, γ 的最佳取值为 0.066 98。图 4 所示为 SVM 模型与 FLAC3D 模型计算的地基系数对比。由图 4 可见, SVM 模型与 FLAC3D 模型的地基系数在训练段和验证段几乎完全重合, 说明训练的 SVM 模型具有很好的精度。

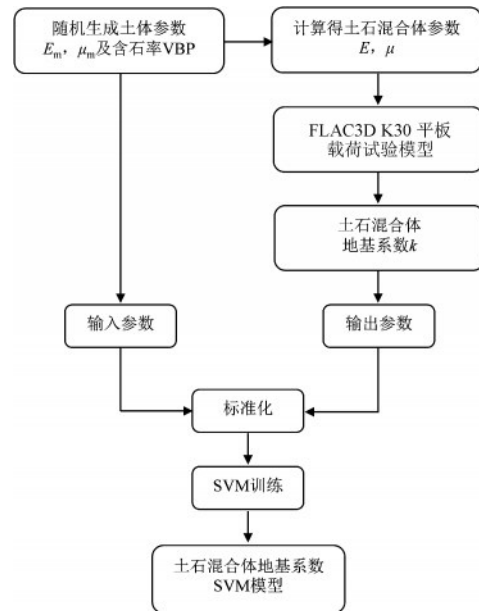


图 3 土石混合体地基系数 SVM 模型流程

Fig.3 Flow chart of soil-rock mixture foundation coefficient SVM model

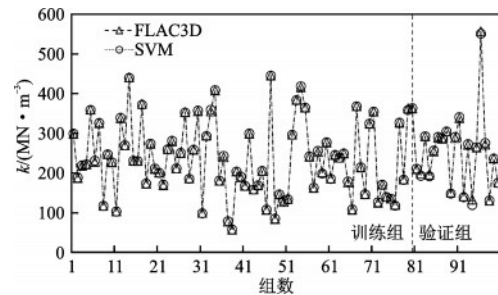


图 4 FLAC3D 与 SVM 地基系数对比

Fig.4 Comparison diagram of FLAC3D and SVM foundation coefficients

2 模型应用

为检验本模型的准确性与适用性,在文献中搜集了5组土石混合体地基系数试验的实测数据^[23-24]。此外,开展了土石混合体平板载荷试验,基于试验数据计算土石混合体地基系数,用于验证SVM模型的适用性。

平板载荷试验选取150 cm×150 cm×50 cm的区域作为试验场地,如图5所示。试验场地分三层进行施工,每层土石混合体摊铺完毕后,使用RDW8-E平板振动夯实机对场地进行夯实。



图5 现场试验
Fig.5 Field test

试验用土石混合体的颗粒级配曲线如图6所示。将土石混合体中粒径大于5 mm的颗粒视作块石,由图6可得试验用土石混合体的含石率为78%。由土体单轴压缩试验得土体弹性模量与泊松比分别为7.53 MPa、0.262。现场试验环境中土石混合体的含水率为14%。

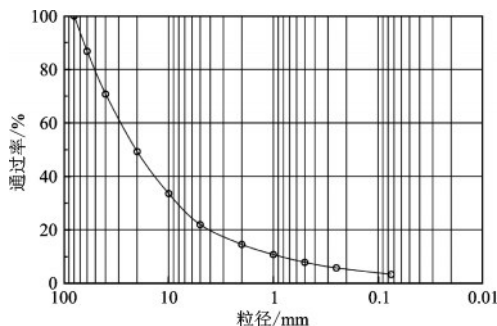


图6 土石混合体颗粒级配曲线
Fig.6 Grain gradation curve of soil-rock mixture

将K30平板载荷仪布置在试验场地上,逐级加载,记录千斤顶读数和百分表读数,测试2次取平均值作为地基系数参考值。试验结果见表2。

基于土石混合体地基系数SVM模型,输入6组

表2 平板载荷试验数据

Table 2 Plate load test data

加载次数	承载板压力P/MPa	千斤顶读数/kN	百分表读数/mm	地基系数k/(MN·m ⁻³)
第一次加载	0.02	1.4	0.34	72.71
	0.04	2.8	0.485	
	0.06	4.2	0.725	
	0.08	5.7	1.065	
	0.10	7.1	1.405	
第二次加载	0.02	1.4	0.315	63.25
	0.04	2.8	0.495	
	0.06	4.2	0.845	
	0.08	5.7	1.270	

试验数据中的 E_m, μ_m 与VBP值,输出地基系数,计算与实测数据的误差,结果见表3。

统计表3中各组试验数据地基系数实测值与SVM模型预测值的相对误差值,计算得其平均值为23.38%,表明SVM模型预测值与实测值的吻合度较高,说明了SVM模型在实际工程应用的可行性与准确性。

表3 土石混合体地基系数试验数据

Table 3 Foundation coefficient test data of soil-rock mixture

组号	E_m /MPa	μ_m	VB/%	实测地基系数/(MN·m ⁻³)	SVM地基系数/(MN·m ⁻³)	相对误差/%
1	42.90	0.210	42	300.40	297.97	0.81
2	31.50	0.210	42	196.50	234.82	19.50
3	17.60	0.210	42	122.70	141.99	15.72
4	10.50	0.210	42	54.70	88.11	61.07
5	13.66	0.222	50	137.73	116.26	15.58
6	7.53	0.262	78	67.98	86.85	27.75

3 讨论

3.1 模型输入因素分析

SVM模型的输入参数为土体弹性模量 E 、土体泊松比 μ 和含石量VBP。采用如下敏感性系数 S 评价每个输入参数对地基系数的影响程度^[25]:

$$S = \eta_1 / \eta_2 \quad (12)$$

$$\eta_1 = |\Delta k| / k_0 \quad (13)$$

$$\eta_2 = |\Delta X| / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (14)$$

式中, ΔX 为因素 X 的变化量; X_{\max} 、 X_{\min} 分别为因素 X 的最大值和最小值; k_0 为各因素的基准值计算出的地基系数的基准值; Δk 为某一因素变化引起的地基系数变化量。 S 值越大表明地基系数对该因素越敏感。

本文中土石混合体地基系数 SVM 模型的敏感性分析以表 1 中各输入参数的平均值作为基准值, 即 $E_m = 30 \text{ MPa}$ 、 $\mu_m = 0.25$ 、 $\text{VBP} = 50\%$ 。假设其他因素不变, 按一定的步长变动某一因素, SVM 模型计算得到的地基系数变化如图 7 所示。图中结果按式(12)~(14)计算得各因素的敏感性系数分别为 $S_E = 0.838 1$ 、 $S_\mu = 0.226 4$ 、 $S_{\text{VBP}} = 0.399 8$ 。敏感性系数排序从大到小依次为土体弹性模量 E 、含石率 VBP 、土体泊松比 μ 。由此可见, 土体弹性模量对土石 VBP 混合体地基系数的影响最大, 其次为含石率, 而土体泊松比对土石混合体地基系数的影响较小。

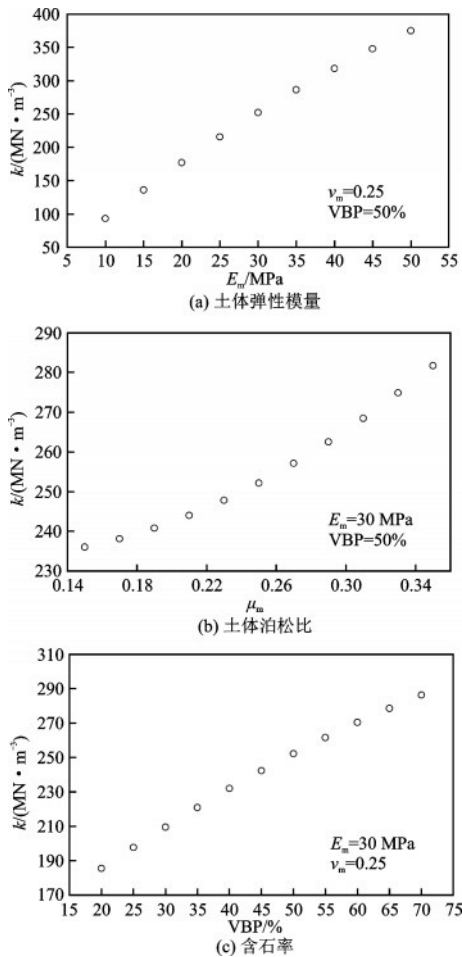


图7 影响因素敏感性分析

Fig.7 Sensitivity analysis of influencing factors

3.2 已有地基系数模型评价

尽管 SVM 模型能够较好地评估土石混合体的地基系数, 但其缺点是不具有显式表达式。表 4 列出了多位学者提出的适用于土体地基系数的计算模型。以表 3 中实测数据和 SVM 模型为基准, 评价上述 5 种模型计算土石混合体地基系数的适用性。

将表 3 中各试验组的 E_m 、 μ_m 代入式(9)、(10)得到土石混合体的 E 、 μ , 通过表 4 的公式计算得到对应模型的地基系数。整理得各模型的平均相对误差为 14.71%、29.99%、12.77%、51.96%、36.89%。结果表明, G.G.Meyerhof 等^[8]模型的平均相对误差最小, M.A.Biot 模型^[6]的平均相对误差次之。

为了进一步比较不同模型, 取基础宽度 $B = 0.3 \text{ m}$, 基础弹性模量 $E_B = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$, 基础刚度 $I_B = 39.07 \text{ cm}^4$ 。当仅改变土体弹性模量 E , 控制土体泊松比 μ 及含石率 VBP 不变时, 土石混合体地基系数计算结果如图 8 所示。由图 8 可见, 上述 5 种模型与土石混合体地基系数 SVM 模型的趋势基本一致。

为了定量评估 5 种模型的适用性, 采用正交设计选取参数, 各参数上下限值见表 1。土体弹性模量选取 5 组, 每组间相差 10 MPa; 土体泊松比选取 3 组, 每组间相差 0.10; 含石率选取 6 组, 每组间相差 10%。正交设计共 90 种组合, 计算每种组合条件下各模型的地基系数值, 统计每种模型计算结果与 SVM 模型相比的相对误差。所有组合平均相对误差最小的模型即最优模型。结果表明, Biot

表 4 土体地基系数模型

Table 4 Sensitivity analysis of influencing factors

模型	计算公式
M.A.Biot ^[6]	$k_m = \frac{0.95E_m}{B \times (1 - \mu_m^2)} \times \left[\frac{B^4 \times E_m}{(E_B I_B)(1 - \mu_m^2)} \right]^{0.108}$
A.B.Vesic ^[7]	$k_m = \frac{0.65E_m}{B \times (1 - \mu_m^2)} \times \left[\frac{B^4 \times E_m}{E_B I_B} \right]^{1/12}$
G.G.Meyerhof 等 ^[8]	$k_m = \frac{E_m}{B \times (1 - \mu_m^2)}$
K.Kloppel 等 ^[9]	$k_m = \frac{2E_m}{B \times (1 + \mu_m)}$
A.P.S.Selvad-ural ^[10]	$k_m = \frac{0.65E_m}{B \times (1 - \mu_m^2)}$

注: k_m 为土体的地基系数, E_m 为土体的弹性模量, μ_m 为土体的泊松比, B 为基础宽度, E_B 为基础弹性模量, I_B 为基础刚度

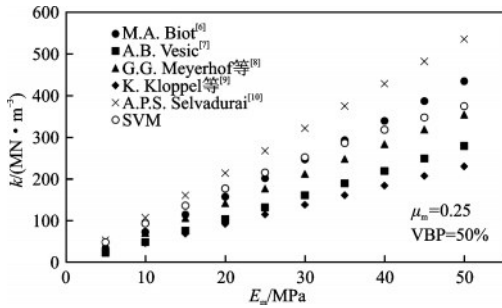


图8 不同模型地基系数对比

Fig.8 Comparison diagram of foundation coefficients of different models

模型^[6]的平均相对误差最小,为12.47%;Meyerhof和Baiké模型^[8]的平均相对误差较小,为15.52%;Vesic^[7]、Kloppe和Glock^[9]、Selvadurai模型^[10]的平均相对误差分别为36.69%、28.55%、44.92%。

基于实测数据和本文提出的土石混合体地基系数SVM模型,可以判断Biot模型^[6]、Meyerhof和Baiké模型^[8]为土石混合体地基系数计算最优的显式模型。实际工程中可考虑使用Biot模型^[6]与Meyerhof和Baiké模型^[8]作为显式模型进行土石混合体地基系数的简化计算。

4 结 论

(1)基于FLAC3D平板载荷模型与土石混合体弹性参数计算模型,以土体弹性模量、土体泊松比及含石率为输入参数,土石混合体地基系数为输出参数,构建了土石混合体地基系数SVM模型。

(2)通过数值试验数据和现场试验,验证了该SVM模型的合理性和准确性。研究说明了土石混合体地基系数SVM模型在实际工程应用的可行性,并提供了2种显式模型方便简化计算。

(3)基于土石混合体地基系数SVM模型的敏感性分析,发现土体弹性模量对土石混合体地基系数的影响最大,其次为含石率。

(4)提出的土石混合体地基系数SVM模型是基于FLAC3D数值试验,随着今后对土石混合体力学特性及相关试验研究的逐渐全面和深入,可以建立基于现场试验的土石混合体力学特性SVM模型。

参考文献:

- [1] 徐文杰,胡瑞林.土石混合体概念、分类及意义[J].水文地质工程地质,2009,36(4):50-56,70.
Xu W J, Hu R L. Conception classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(4): 50-56, 70. (in Chinese)
- [2] 油新华,汤劲松.土石混合体野外水平推剪试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10):1537-1540.
You X H, Tang J S. Research on horizontal push-shear in-situ test of soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1537-1540. (in Chinese)
- [3] 廖秋林,李晓,郝钊,等.土石混合体的研究现状及研究展望[J].工程地质学报,2006,14(6):800-807.
Liao Q L, Li X, Hao Zh, et al. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates (RSA) [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(6): 800-807. (in Chinese)
- [4] Winkler E. Theory of elasticity and strength [M]. Czechoslovakia: Prague, 1867.
- [5] 仲锁庆,张西平,潘海利.地基土基床系数研究[J].地下空间与工程学报,2005(增1):1109-1112.
Zhong S Q, Zhang X P, Pan H L. Study on foundation soil coefficient of subgrade reaction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(Sup 1): 1109-1112. (in Chinese)
- [6] Biot M A. Bending of infinite beams on an elastic foundation[J]. Journal of Applied Mechanics, 1937, 4(1): 1-7.
- [7] Vesic A B. Beams on elastic subgrade and Winkler's hypothesis[C]//Proceedings 5th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris: [s.n.], 1961:845-850.
- [8] Meyerhof G G, Baiké L D. Strength of steel culverts sheets bearing against compacted sand backfill[J]. Highway Research Record, 1963(30):1-19.
- [9] Kloppel K, Glock D. Theoretische und experimentelle untersuchungen zu den traglastproblemen beigewiecher, in die erde eingebetteter rohre[M]. Darmstadt: Technischen Hochschule, 1970.

- [10] Selvadurai A P S. Elastic analysis of soil-foundation interaction[M]. New York: Elsevier Publishing Company, Limited, 1979.
- [11] Burhan A, Ayhan G. Modulus of subgrade reaction that varies with magnitude of displacement of cohesionless soil [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11 (13):1-8.
- [12] Lee J, Jeong S. Experimental study of estimating the subgrade reaction modulus on jointed rock foundations [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49 (6):2055-2064.
- [13] Hashin Z. The moduli of an elastic solid reinforced by rigid particles [J]. Bulletin Research Council of Israel, 1955, 5:46-59.
- [14] Vallejo L E, Lobo-Guerrero S. The elastic moduli of clays with dispersed oversized particles [J]. Engineering Geology, 2005, 78(1):163-171.
- [15] Yu Y, Sun H Y, Juang C H. A new model for response of laterally loaded piles in soil-rock mixtures [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104:237-246.
- [16] Tsesarsky M, Hazan M, Gal E. Estimating the elastic moduli and isotropy of block in matrix (bim) rocks by computational homogenization [J]. Engineering Geology, 2016, 200:58-65.
- [17] Sonmez H, Gokceoglu C, Nefeslioglu H A, et al. Estimation of rock modulus: For intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(2):224-235.
- [18] 王宇, 李晓, 胡瑞林, 等. 岩土超声波测试研究进展及应用综述 [J]. 工程地质学报, 2015, 23(2):287-300.
Wang Y, Li X, Hu R L, et al. Review of research process and application of ultrasonic testing for rock and soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23 (2) : 287-300. (in Chinese)
- [19] 金磊, 曾亚武, 张森. 块石含量及形状对胶结土石混合体力学性能影响的大型三轴试验 [J]. 岩土力学, 2017, 38(1):141-149.
Jin L, Zeng Y W, Zhang S. Large-scale triaxial tests on effects of rock block proportion and shape on mechanical properties of cemented soil-rock mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (1) : 141-149. (in Chinese)
- [20] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks [J]. Machine Learning, 1995, 20(3):273-297.
- [21] Terzaghi K. Evaluation of coefficients of subgrade reaction [J]. Géotechnique, 1955, 5(4):297-326.
- [22] 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S].北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [23] 邓超. 土石混合体压实特性试验研究与高填路堤稳定性分析 [D]. 长沙:长沙理工大学, 2016.
Deng Ch. Experimental study of compaction property for soil-rock mixture and analysis of stability on high embankment [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016. (in Chinese)
- [24] 王江营. 土石混填体变形力学特性及其地基稳定性分析方法 [D]. 长沙:湖南大学, 2014.
Wang J Y. Research on deformation characteristics of soil-rock aggregate mixture and stability analysis method of soil-rock filled foundation [D]. Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese)
- [25] 许建聪, 尚岳全. 碎石土滑坡的因素敏感性计算分析 [J]. 岩土力学, 2007, 28(10):2046-2051.
Xu J C, Shang Y Q. Sensitivity analysis of influencing factors of debris landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10):2046-2051. (in Chinese)

(本文责编:池营营)