

文章编号: 1005-0523(2021)04-0001-07



# 列车荷载下软土路基长期沉降预测研究进展

徐长节<sup>1,2</sup>, 丁海滨<sup>1,2</sup>, 童立红<sup>1,2</sup>

- (1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 随着我国高速铁路的快速发展, 列车荷载作用下软土路基的长期沉降问题备受人们关注。简要回顾了本构模型法、经验模型法及机器学习法在路基沉降计算及预测中的应用, 调研显示, 目前的研究中对于荷载形式的选择没有统一; 没有考虑列车荷载下土体的模量的软化对路基长期沉降的影响; 没有考虑列车荷载的间歇性影响。

**关键词:** 列车荷载; 软土路基; 长期沉降

中图分类号: TU471

文献标志码: A

本文引用格式: 徐长节, 丁海滨, 童立红. 列车荷载下软土路基长期沉降预测研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 1-7.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.04.002

## Research Progress in the Long-Term Settlement of Soft Soil Subgrade Subjected to Train Load

Xu Changjie<sup>1,2</sup>, Ding Haibin<sup>1,2</sup>, Tong Lihong<sup>1,2</sup>

- (1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Recently, with the rapid development of the high-speed railway in our country, the long-term settlement of the soft soil subgrade subjected to train load has attracted our attention. In this work, the application of constitutive model method, experiment model and the machine learning method on the calculation and prediction of the settlement of subgrade was reviewed briefly. The investigation shows that the unified recognition to the train load was not formed. The influence of modulus softening of the subgrade subjected to the train load on the long-term settlement of subgrade are not considered, and the influence of the load harmonic was also not considered.

**Key words:** train load; soft soil subgrade; long-term settlement

**Citation format:** XU C J, DING H B, TONG L H. Research progress in the long-term settlement of soft soil subgrade subjected to train load[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 1-7.

近二十年来,我国铁路、公路及机场等基础设施的建设取得了突飞猛进的发展,尤其是近年来,我国高速铁路发展迅速,截止2020年底,我国高速铁路的总里程已经突破3.8万km,居世界首位,且该数字还将继续攀升。我国幅员辽阔,各地区地质

条件复杂多样,很多基础设施不得不修建在软土地基上,而列车荷载的长期作用会使软土路基产生累积沉降,由此给行车安全带来隐患。如:由兰州至新疆的“兰新高铁”,于2014年12月开通运营,截止2016年6月,该路段路基最大累计沉降达67.2mm,

收稿日期: 2021-07-05 | China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51725802); 国家自然科学基金-高铁联合基金项目(U1934208)

作者简介: 徐长节(1972—),男,教授,博士,研究方向为土动力学,基坑工程及隧道工程等。E-mail: xucj@zju.edu.cn。

严重超出《高速铁路设计规范》中规定的工后沉降不大于 15 mm 的要求<sup>[1]</sup>;上海地铁一号线,未通车期间沉降基本处于稳定状态,而通车后,全线年度差异沉降达 30 mm<sup>[2]</sup>。此外,有诸多研究表明,路基在建设完成时沉降已基本趋于稳定,而投入运营后沉降会显著增加,由此说明了列车荷载对路基沉降的影响显著。为此,国内外学者对长期列车荷载下路基的累积沉降问题展开了研究。软土地基产生工后沉降的原因是软土地基由于渗透性低,短时间内可视为不排水,在列车循环荷载作用下,软土地基塑性应变及孔隙水压力累积,从而造成土体软化,随着时间的推移,孔隙水压力将逐渐消散,从而产生固结沉降<sup>[3-4]</sup>。

目前,国内外对于列车荷载作用下地基长期沉降研究的主要方法可归纳为本构模型法、经验模型法及机器学习法。本文也将从以上 3 个方面对路基沉降的国内外研究现状展开综述。

## 1 本构模型法

长期列车荷载作用下,软土路基沉降的合理预测需要明确 2 个基本问题,即列车荷载下软土地基内动应力分布规律及软土地基在长期动荷载下的变形特性。针对上述问题,学者们通过构建软土理论本构模型并与数值分析方法结合研究交通荷载下软土地基的长期沉降问题。如 Mroz 等<sup>[5]</sup>提出了各项异性硬化模型,研究了循环荷载作用下土体动力特性。胡存等<sup>[6-7]</sup>建立了能合理反映饱和软黏土循环稳定和循环退化动力特性的无弹性域界面模型,同时提出广义各向同性硬化准则,并应用该模型对饱和黏土在长期低应力水平下的循环动力特性进行了预测。Abdelkrim 等<sup>[8]</sup>和葛世平等<sup>[9]</sup>采用弹塑性本构模型,研究了循环列车荷载下地基沉降变形规律。长期循环荷载下,构建能反应土体动力特性的本构模型的最常用方法是通过实验确定循环荷载下土体变形特性,而后根据试验结果构建其本构模型。如 Li 等<sup>[10]</sup>通过室内试验得到了冻土累积应变的经验公式,将经验公式与经典弹塑性理论相结合,构建了长期低水平反复荷载作用下的冻土本构模型,模拟了冻土在长期低水平反复荷载下的动力特性。Chen 等<sup>[11]</sup>考虑了循环荷载幅值、次数、循环静偏应力及强度的影响,基于室内试验,构建了长期循环荷载下有机土的本构模型,并结合有限元法,分

析了长期循环荷载下地基的动力特性。本构模型法可以很好地反映列车循环荷载下路基的变形机制,但是对于长达数万次甚至数百万次的交通荷载引起的变形,采用本构模型法,存在计算过程复杂、计算耗时长且计算精度难以控制等问题,并不利于在实际工程中使用。此外,影响路基长期沉降的因素很多,而土体本构模型所能考虑到的因素有限,这也一定程度上制约了本构模型法在预测路基长期沉降中的应用。

## 2 经验模型法

为研究列车长期循环荷载所引起地基长期沉降,学者们普遍采用的研究方法为经验模型法,即通过对地基土进行室内大周次循环动三轴试验,用以模拟列车循环荷载对地基的长期作用,而后根据试验结果提出长期沉降预测经验模型。迄今为止,国内外学者所建立的循环荷载下饱和软黏土的塑性累积计算模型多达几十种,其中,Monismith 等<sup>[12]</sup>所提出的指数模型应用的最为广泛,其指出,软黏土的塑性累积应变与循环次数的关系为

$$\varepsilon_p = A_0 N^b \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_p$  为累积塑性应变; $N$  为循环次数; $A_0, b$  均为拟合参数。

Parr 等<sup>[13]</sup>也提出循环荷载下黏土变形特性的计算模型

$$\log \left( \frac{\bar{\varepsilon}_N}{\varepsilon_1} \right) = \log C - \chi \log N \quad (2)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_N$  为每个循环下的平均塑性应变; $\varepsilon_1$  为第一个循环后的塑性应变; $\chi$  为衰减系数; $C$  是待定系数。

Monismith 等所提出的模型展现了循环次数对累积塑性应变的影响,而其它因素的影响仅采用拟合参数  $A_0, b$  来体现,拟合参数取值不确定性较大,计算结果误差相对较大。Li 等<sup>[14-15]</sup>将动偏应力和土体静强度引入至 Monismith 等所提出的模型中,通过室内试验的结果对指数模型进行了改进,得出

$$\varepsilon_p = a (\sigma_d / \sigma_s)^m N^b \quad (3)$$

式中: $a$  和  $m$  为材料参数; $\sigma_d$  为动偏应力幅值; $\sigma_s$  为土体静强度。

Chai 等<sup>[16]</sup>在 Li 等模型的基础上,考虑了土体初始剪应力的影响,提了一种新的指数预测模型,用

以预测交通荷载下软土地基的沉降,即

$$\varepsilon_p = a_0 \left( \frac{\sigma_d}{\sigma_f} \right)^{m_0} \left( 1 + \frac{\sigma_s}{\sigma_f} \right)^{n_0} N^{b_0} \quad (4)$$

式中: $\sigma_f$ 为静破坏剪应力; $a_0, m_0, n_0$ 和 $b_0$ 均为试验拟合参数。

瞿帅等<sup>[17]</sup>和刘维正等<sup>[18]</sup>对重塑土进行了动三轴试验,讨论了固结围压 $\sigma_3$ 、动应力比 $\eta_d(\eta_d = \sigma_d / \sigma_3)$ 对土体累计应变的影响,并基于试验结果建立了土体稳定型及破坏型累积应变预测模型。

1) 稳定型,即随着循环荷载加载次数的增加,土体累积应变逐渐趋于稳定值,其预测模型为

$$\varepsilon_p^s = a_1 \left( \frac{\sigma_d}{S_{\sigma} q_{uit}^*} \right)^{m_1} \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_1} e^{-\left(\frac{k}{N}\right)^{b_1}} \quad (5)$$

2) 破坏型,即随着循环荷载次数的增加,土体累积塑性应变逐渐增加,并最终破坏,其预测模型为

$$\varepsilon_p^d = a_2 \left( \frac{\sigma_d}{S_{\sigma} q_{uit}^*} \right)^{m_2} \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_2} N^{b_2} \quad (6)$$

式中: $\varepsilon_p^s, \varepsilon_p^d$ 分别为稳定型和破坏型土体累积塑性应变;其余参数参见文献[17]。

Deng等<sup>[19]</sup>开展了一系列的三轴试验,并结合简单的能量方法研究了软黏土累积变形特性。Shen等<sup>[20]</sup>利用室内模型试验构建了荷载频率对累积塑性应变的影响,即

$$\varepsilon_p^s = m \left( \frac{f}{f_0} \right)^n + k \left( \frac{f}{f_0} \right)^l \lg \frac{N}{100} \quad (7)$$

式中: $f_0 = 1$  Hz; $f$ 为荷载激励频率; $m, n, k$ 及 $l$ 为拟合参数。

以上学者基于试验构建了长期循环荷载下软黏土的累积塑性应变模型,此外国内外还有大量学者通过实验对软土的沉降展开了研究<sup>[21-34]</sup>,并构建了各种长期沉降经验预测模型,如黄茂松等对上海软黏土进行了不排水循环三轴试验,分析了循环荷载次数、初始偏应力和循环加载动偏应力对软黏土塑性累积的影响,并给出了软黏土塑性累积应变的指数修正模型。Ren等通过与Hardin-Drnevich和Monismith模型类比,提出一种具有3参数的经验模型,通过与试验对比发现,该模型比Monismith模型更适合用于模拟长期循环荷载所引起软黏土的累积塑性应变<sup>[4-2]</sup>。王军等<sup>[35]</sup>建立了饱和软黏土的累积塑性应变模型,考虑了循环应力比、超固结比及荷

载振动频率等因素的影响,并结合修正的Iwan模型,得到了循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变经验计算式。随着岩土设备的发展,为反映列车荷载所引起地基内主应力轴旋转对地基累积塑性应变的影响,学者们采用了GDS空心扭剪仪进行了考虑主应力轴旋转的试验<sup>[36-38]</sup>,如Wu等<sup>[39]</sup>采用空心扭剪仪进行了不同应力路径试验,模拟了交通荷载对温州软土变形的影响,并提出了考虑主应力轴旋转的塑性累积应变经验模型。

通过室内动三轴试验可以模拟大周次循环荷载对土体动力特性的影响,进而根据试验结果得出长期循环荷载下软黏土塑性累积应变的经验公式。然而,室内动三轴试验仍然是比较理想的情况,难以反映真实列车荷载的复杂工况,所建立的经验模型用于预测实际工程路基的长期沉降存在一定的误差。

### 3 机器学习法

前面所述的本构模型法是在大量假设基础上而提出,而经验模型法是在进行大量室内动三轴基础上,根据试验结果得到,此两种方法所得到的模型均为理想模型。在实际工程中,列车荷载为间歇性动荷载,且实际土层复杂多样,采用上述两种方法难以准确地预测列车循环荷载下软土路基的长期沉降。近年来,随着计算机的快速发展,机器学习法在土木工程中得到广泛应用。机器学习法通常是根据现场的实测数据对模型进行训练,从而使其能够预测后期路基沉降发展情况。目前,在路基长期沉降预测中,常用的机器学习方法有:人工神经网络<sup>[40-41]</sup>,灰度预测理论<sup>[42-43]</sup>及蚁群算法<sup>[44-45]</sup>等。Bi等<sup>[46]</sup>基于人工神经网络和后传播算法,提出了预测路基沉降的算法,并利用实测数据对其进行训练,确定了模型中的参数,结果表明该方法对预测地基沉降具有较高的精度。Li等<sup>[47]</sup>利用已有的沉降监测数据,提出了基于BP人工神经网络的软土地基沉降预测方法。Luo等<sup>[48]</sup>建立了模糊神经网络法,并将其应用于广西桂河路软土地基沉降预测中,结果表明,该模型对短期沉降的预测较为准确。此外,还有很多学者采用人工神经网络及其改进算法对路基沉降进行了研究<sup>[49-53]</sup>。相比于神经网络算法,目前灰色预测在高速公路路基沉降的预测中有较多的应用<sup>[54-56]</sup>,而蚁群算法则在隧道沉降中有较多的应

用<sup>[57-60]</sup>。

相比本构模型法和经验模型法,机器学习法是在大量的现场实测数据基础上,对后期的路基沉降进行预测,能够较为准确地反映实际工程的情况,预测结果精度也较高。但该方法仅能对短期沉降进行预测,需要不断利用现场实测数据来修正后期的预测结果,保证预测精度。即便如此,该方法仍然由于其预测精度较高,而在工程中得到了广泛的应用。

#### 4 结束语

简要回顾了列车荷载作用下路基沉降计算及预测方法。目前,列车荷载下路基的长期沉降预测问题仍是困扰学者们的难题,主要有以下问题亟待解决:

1) 目前对列车荷载形式的选择没有统一的定论,确定合理的荷载形式,对研究列车荷载下引起路基沉降具有重要意义;

2) 动荷载作用下土体模量会发生软化,而荷载移除后,模量又会有有一定的恢复,目前计算路基长期沉降时,都没有考虑模量软化的影响;

3) 实际列车荷载为间歇性荷载,目前研究列车荷载下路基沉降问题时,都是将荷载简化为持续施加的荷载;因此考虑荷载施加的时间间隙对准确预测地基沉降也具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] 程康. 兰新高速铁路某区段路基沉降整治措施及治理效果研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.  
CHENG K. The study on remediation measures and treatment effect of a section of Lanzhou-Xinjiang high speed railway subgrade settlement[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2018.
- [2] 陈基炜,詹龙喜. 上海市地铁一号线隧道变形测量及规律分析[J]. 上海地质,2000(2):51-56.  
CHEN J W,ZHAN L X. Deformation measuring of the metro tunnel and deformation data analysis of shanghai metro line No.1[J]. Shanghai Geology,2000(2):51-56.
- [3] 王军,蔡袁强. 循环荷载作用下饱和软黏土应变累积模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,17(1):331-338.  
WANG J,CAI Y Q. Study on accumulative plastic strain model of soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,17(1):331-338.

- [4] 周健,屠洪权. 动力荷载作用下软粘土的残余变形计算模式[J]. 岩土力学,1996,17(1):54-60.  
ZHOU J,TU H Q. A model for predicting the cyclic behaviour of soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics,1996,17(1):54-60.
- [5] MROZ Z,NORRIS V A,ZIENKIEWICZ O C. An anisotropic hardening model for soils and its application to cyclic loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1978,2(3):203-221.
- [6] 胡存. 适用于饱和黏土循环动力分析的边界面塑性模型及应用[D]. 天津:天津大学,2012.  
HU C. Anisotropic bounding-surface plasticity model for cyclic behaviors of saturated clay and its application[D]. Tianjin:Tianjin University,2012.
- [7] 胡存,刘海笑. 适用于饱和黏土循环动力分析的新型边界面塑性模型[J]. 水利学报,2011,42(10):1192-1200.  
HU C,LIU H X. A new type of bounding surface plasticity model for cyclic behavior of saturated clay[J]. Shuili Xuebao,2011,42(10):1192-1200.
- [8] ABDELKRIM M,BONNET G,BUHAN P. A computational procedure for predicting the long term residual settlement of a platform induced by repeated traffic loading[J]. Computers and Geotechnics,2003,30(6):463-476.
- [9] 葛世平,姚湘静,叶斌,等. 列车振动荷载作用下隧道周边软黏土长期沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(11):2359-2368.  
GE S P,YAO X J,YE B,et al. Analysis of long-term settlement of soft clay under train vibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(11):2359-2368.
- [10] LI Q,LING X,SHENG D. Elasto-plastic behaviour of frozen soil subjected to long-term low-level repeated loading,Part II:Constitutive modelling[J]. Cold Regions Science and Technology,2016,125:58-70.
- [11] CHEN C,XU G,ZHOU Z,et al. Undrained dynamic behaviour of peaty organic soil under long-term cyclic loading,Part II: Constitutive model and simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2020,129:279-291.
- [12] MONISMITH C L,OGAWA N,FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record,1975,16(12):1-17.
- [13] PARR G B,GEORGE B. Some aspects of the behaviour of London clay under repeated loading[D]. University of Nottingham,1972.
- [14] LI D,SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-

- grained subgrade soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(12): 1006–1013.
- [15] LI D, SELIG E T. Method for railroad track foundation design[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(4): 323–329.
- [16] CHAI J C, MIURA N. Traffic load induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(11): 907–916.
- [17] 瞿帅, 刘维正, 聂志红. 长期循环荷载下人工结构性软土累积变形规律及预测模型[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(4): 975–984.
- QU S, LIU W Z, NIE Z H. Change law and prediction model for accumulative deformation of artificial structured soft soil under long-term cyclic loading[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(4): 975–984.
- [18] 刘维正, 石志国, 章定义, 等. 交通荷载作用下结构性软土地基长期沉降计算[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(4): 726–735.
- LIU W Z, SHI Z G, ZHANG D W, et al. Long-term settlement calculation of structured soft clay foundation under traffic loading[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2018, 48(4): 726–735.
- [19] DENG Q L, REN X W. An energy method for deformation behavior of soft clay under cyclic loads based on dynamic response analysis[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 94: 75–82.
- [20] SHEN Y, XU H D, TAO M G, et al. Settlement of soft clay subgrade under coupled effects of vibration frequency and dynamic stress ratio caused by high-speed train loads[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, 54(2): 87–96.
- [21] NIEMUNIS A, WICHTMANN T, TRIANTAFYLIDIS T. A high-cycle accumulation model for sand[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(4): 245–263.
- [22] KARG C, FRANOIS S, HAEGEMAN W, et al. Elasto-plastic long-term behavior of granular soils: Modelling and experimental validation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(8): 635–646.
- [23] LI Q, LING X, SHENG D. Elasto-plastic behaviour of frozen soil subjected to longterm lowlevel repeated loading, Part I: Experimental investigation[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 125: 138–151.
- [24] SALOUR F, ERLINGSSON S. Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RFL tests[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017, 18(3): 236–246.
- [25] CHEN C, ZHOU Z, KONG L, et al. Undrained dynamic behaviour of peaty organic soil under long-term cyclic loading, Part I: Experimental investigation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 107: 279–291.
- [26] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(7): 891–895.
- HUANG M S, LI J J, LI X Z. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(7): 891–895.
- [27] REN X W, XU Q, TENG J D, et al. A novel model for the cumulative plastic strain of soft marine clay under long-term low cyclic loads [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 149: 194–204.
- [28] 王军, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(8): 1713–1719.
- WANG JUN, CAI Y Q, XU C J, et al. Study on strain softening model of saturated soft clay under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1713–1719.
- [29] 王军, 蔡袁强, 李校兵. 循环荷载作用下超固结软黏土软化-孔压模型研究[J]. *岩土力学* 2008, 29(12): 3217–3222.
- WANG J, CAI Y Q, LI X B. Cyclic softening-pore pressure generation model for overconsolidated clay under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(12): 3217–3222.
- [30] QIAN J G, LI S Y, GU X Q, et al. A unified model for estimating the permanent deformation of sand under a large number of cyclic loads[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 181: 293–302.
- [31] LI Y F, NIE R S, YUE Z R, et al. Dynamic behaviors of fine-grained subgrade soil under single-stage and multi-stage intermittent cyclic loading: Permanent deformation and its prediction model[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 142: 106548.
- [32] XIA P, ZENG C, SHAO L, et al. Axial strain accumulation projection model for sand in cyclic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 147: 1–12.
- [33] ZANG M, KONG L W, ZHANG R T, et al. Simplified calculation method for cumulative deformations of marine structured clay under cyclic loading[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(11): 1–12.
- [34] ZHU W B, DAI G L, GONG W M. Study on cyclic cumulative deformation characteristics and the equivalent cyclic creep model of soft clay[J]. *Mathematical Problems in En-*

- gineering, 2021, 11: 1-11.
- [35] NARASIMHA RAO S, PANDA A P. Non-linear analysis of undrained cyclic strength of soft marine clay[J]. *Ocean Engineering*, 1998, 26(3): 241-253.
- [36] CAI Y Q, WU T Y, GUO L, et al. Stiffness degradation and plastic strain accumulation of clay under cyclic load with principal stress rotation and deviatoric stress variation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(5): 1-11.
- [37] 伍婷玉. 交通荷载引起主应力轴旋转下粘土应变累积及非共轴特性[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
WU T Y. Strain accumulation and non-coaxial characteristics of clay under principal stress rotation induced by traffic loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [38] 陶冶. 车辆荷载作用下路基沉降计算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
TAO Y. Study on subgrade settlement calculation method-under vehicle loads[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [39] WU T Y, CAI Y Q, GUO L, et al. Influence of shear stress level on cyclic deformation behaviour of intact Wenzhou soft clay under traffic loading[J]. *Engineering Geology*, 2017, 228: 61-70.
- [40] QI C Q, WU Q B, SHI B, et al. Application of BP neural network on deformation prediction for permafrost embankment[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(4): 27-30.
- [41] CHIK Z, ALJANABI Q A, KASA A, et al. Tenfold cross validation artificial neural network modeling of the settlement behavior of a stone column under a highway embankment[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(11): 4877-4887.
- [42] 杜彦良, 姬来, 刘新福. 高速铁路路基施工期沉降量的灰色预测模型及应用[J]. *铁道科学与工程学报*, 2009, 6(1): 36-40.  
DU Y L, JI L, LIU X F. Grey prediction model for construction settlement forecast of embankment of high-speed railway and its application[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2009, 6(1): 36-40.
- [43] 袁明月, 周吕, 文鸿雁, 等. 灰色系统与时间序列在高铁沉降变形中的应用[J]. *地理空间信息*, 2013, 11(4): 131-133.  
YUAN M Y, ZHOU L, WEN H Y, et al. Application of grey system and time series in settlement deformation of high speed railway[J]. *Geospatial Information*, 2013, 11(4): 131-133.
- [44] 韦凯, 宫全美, 周顺华. 隧道长期不均匀沉降预测的蚁群算法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(8): 993-998.  
WEI K, GONG Q M, ZHOU S H. Ant colony algorithms of long-term uneven settlement prediction in tunnel[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2009, 37(8): 993-998.
- [45] 韦凯, 宫全美, 周顺华. 基于蚁群算法的地铁盾构隧道长期沉降预测[J]. *铁道学报*, 2008, 30(4): 79-83.  
WEI K, GONG Q M, ZHOU S H. Forecast of long-term settlement of metro tunnel on the basis of ant colony optimization[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2008, 30(4): 79-83.
- [46] BI Q T, DING S Y. Neural networks model for settlement prediction of embankment[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 197: 722-726.
- [47] LI S L, HE S Y, WANG X T, et al. Prediction of soft ground settlement by BP neural network[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014: 825-828.
- [48] LUO J, WU C, LIU X, et al. Prediction of soft soil foundation settlement in Guangxi granite area based on fuzzy neural network model[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 108: 032034.
- [49] 郭亚宇, 孙立功, 苏兆仁. 改进的 BP 神经网络在路基沉降预测中的应用[J]. *勘察科学技术*, 2010(5): 28-31.  
GUO Y Y, SUN L G, SU Z R. Application of improved BP neural network in prediction of subgrade settlement[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2010(5): 28-31.
- [50] 杨柳. 京沪高速铁路济南西客站软土路基沉降预测分析[J]. *路基工程*, 2012, (1): 15-17.  
YANG L. Analysis on settlement prediction of soft soil subgrade for jinan west railway station of beijing-shanghai high-speed railway[J]. *Subgrade Engineering*, 2012(1): 15-17.
- [51] 甄亚男, 张献州. 基于改进遗传算法的 BP 神经网络在高速铁路沉降预测中的应用[C]//全国工程测量 2012 技术研讨交流会, 沈阳, 2012.  
ZHEN Y N, ZHANG X Z. Application of BP neural network based on improved genetic algorithm in settlement prediction of high speed railway[C]//National Engineering Survey 2012 Technology Seminar and Exchange Meeting, Shenyang, 2012.
- [52] MAMAT R C, KASA A, RAZALI S F M, et al. Application of artificial intelligence in predicting ground settlement on earth slope[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2138(1): 040015.
- [53] BEI Q, XUANMIN L. A subgrade settlement prediction

- model based on improved particle swarm neural network[C]// In Proceedings of the 2020 International Conference on Computers, Information Processing and Advanced Education, Association for Computing Machinery, Ottawa, Canada, 2020.
- [54] 陈希鸣,黄张裕,王睿,等. 基于灰色 GM(1,1)与指数曲线组合模型的高速公路沉降预测[J]. 勘察科学技术, 2019(1): 10-12.
- CHEN X M, HUANG Z Y, WANG R, et al. Freeway settlement prediction based on combination of grey GM(1, 1) and exponential curve model[J]. Site Investigation Science and Technology, 2019(1): 10-12.
- [55] 刘建威,钟泽湘. 基于改进灰色 GM(1, 1)模型的高速公路路基沉降预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1369-1373.
- LIU J W, ZHONG Z X. Prediction of expressway subgrade settlement based on an improved gray prediction model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1369-1373.
- [56] 刘鹏鹏. 基于灰色组合模型的高速铁路路基沉降预测及应用研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2020.
- LIU P P. Research on prediction and application of subgrade settlement of high speed railway based on Grey Combination Model[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [57] 陈喜凤,刘岭,黄腾. 基于蚁群算法的地铁隧道沉降预测研究[J]. 隧道建设, 2013, 33(6): 462-468.
- CHEN X F, LIU L, HUANG T. Study on settlement prediction of metro tunnels based on ant colony algorithm[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(6): 462-468.
- [58] 郝如江,季雁鹏,倪振利. 基于 DEACO-WNN 的盾构施工地表沉降预测[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(1): 12-16.
- HAO R J, JI Y P, NI Z L. Study on predicting the surface settlement for shield tunneling based on DEACO-WNN[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(1): 12-16.
- [59] 韦凯. 基于蚁群算法的软土盾构隧道长期不均匀沉降预测模型[D]. 上海:同济大学, 2009.
- WEI K. Prediction model of long-term uneven settlement of shield tunnel in soft soil based on ant colony algorithm[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [60] 韦凯,宫全美,周顺华. 软土盾构隧道不均匀沉降预测的蚁群算法改进及参数选取[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(S1), 3022-3031.
- WEI K, GONG Q M, ZHOU S H. Improvement of ant colony algorithm for predicting uneven settlements of shield tunnel in soft soil and its parameters selection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(S1), 3022-3031.

(责任编辑:刘棉玲)



特约专家徐长节:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学党委副书记、副校长(主持行政工作),教育部“长江学者”特聘教授,国家杰出青年基金获得者,“万人计划”科技领军人才,国家百千万人才工程入选者,国务院特殊津贴获得者。主持及参与国家及省部级科研项目 10 余项、工程项目 100 余项。获国家科技进步二等奖等。



特约专家陈梦成:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学党委委员、副校长,江西省先进工作者,中国优秀留学回归人员,赣鄱英才 555 工程领军人才,江西省优势科技创新团队学术带头人。主持完成及在研国家 973、国家自然科学基金江西省等各类科研项目 30 余项;发表学术论文 400 余篇。获省部级奖项 5 项等。



特约专家刘林芽:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学副校长,国家百千万人才工程国家级人选,教育部新学回归人员,赣鄱英才 555 工程领军人才,主持国家自然科学基金、教育部等各类科研项目 50 余项。获国家科技进步二等奖,江西省自然科学一等奖等奖项 11 项。



特约专家杨辉:男,二级教授,博士生导师。新世纪百千万人才工程国家级人选,赣鄱英才 555 工程领军人才,江西省优势科技创新团队领军人才,获国务院特殊津贴、江西省突出贡献人才等荣誉,现任华东交通大学副校长,江西省人大常委。获江西省自然科学奖一等奖、江西省技术发明一等奖等省部级奖项 7 项。



特约专家罗文俊:女,教授,博士生导师。现任华东交通大学副校长,防灾减灾研究所所长。教育部青年长江学者,江西省主要学科学术及技术带头人,首批江西省青年井岗学者,享受国务院特殊津贴专家。主持国家自然科学基金 4 项,省部级科研课题 10 余项。获教育部科技进步二等奖 2 项,江西省科技进步一等奖等。



特约专家刘燕德:女,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学首席教授,华东交通大学首批天佑学者,智能机电装备创新研究院院长,第三批国家“万人计划”领军人才,科技部重点领域创新团队负责人,江西省光电检测工程技术中心主任等。获江西省科技进步一等奖、江西省自然科学二等奖等省部级奖项 8 项。



特约专家宋立军:男,教授,博士生导师,智能激光制造湖南省重点实验室主任。研究方向:激光智能制造(3D 打印、超快激光微纳制造)、激光光谱学、激光制造材料科学、传感及控制。主持及参与多项国家自然科学基金、湖南省等各类科研项目。获中国机械工业联合会和中国机械工程学会一等奖等。



特约专家肖乾:男,教授,博士生导师。现任华东交通大学机电与车辆工程学院院长,华东交通大学天佑拔尖人才,江西省百千万人才工程入选,获全国詹天佑铁道科学技术奖青年奖、茅以升铁道科学技术奖、江西省科技进步一等奖等。近 5 年来,主持国家自然科学基金 3 项,省部级科研课题多项以及企业横向课题等近 20 项。