

文章编号: 1005-0523(2025)02-0001-14



列车荷载下高铁路基累积沉降研究综述

徐长节^{1,2}, 管凌霄^{1,2}, 童立红^{1,2}, 丁海滨^{1,2}

(1. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西 南昌 330013;

2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:路基作为高铁工程重要的基础结构,其长期稳定性直接关系到铁路运输的安全性与乘客乘坐的舒适性。随着高铁列车速度的持续提升和载重量的不断增加,路基在动态荷载作用下的累积沉降问题日益显著,已成为铁道工程、岩土工程、工程力学等多个学科交叉研究的前沿领域和热点问题。文章总结了高速列车荷载下路基累积沉降的国内外研究成果,重点围绕路基累积沉降的试验研究、理论研究、影响因素等方面,揭示了高铁路基长期沉降的复杂性和关键技术挑战,并提出了未来研究展望,包括探讨间歇荷载对路基长期变形的影响,路基填料颗粒破碎机制及对路基性质的影响等,为高铁工程设计提供理论支撑。

关键词:高铁路基;累积沉降;列车荷载;试验研究;计算模型;离散元方法;间歇荷载

中图分类号: TU471; U216

文献标志码: A

本文引用格式: 徐长节, 管凌霄, 童立红, 等. 列车荷载下高铁路基累积沉降研究综述[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(2): 1-14.

Review on Cumulative Settlement of High-Speed Railway Subgrade Under Train Loading

Xu Changjie^{1,2}, Guan Lingxiao^{1,2}, Tong Lihong^{1,2}, Ding Haibin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The subgrade is an essential structural foundation in high-speed railway engineering, and its long-term stability directly affects railway transportation safety. With continuously increasing train speeds and axle loads, cumulative settlement of subgrades under dynamic loading is becoming increasingly prominent. Consequently, it has emerged as a critical interdisciplinary research hotspot across railway engineering, geotechnical engineering, and engineering mechanics. This paper reviews domestic and international research achievements regarding cumulative settlement of subgrades subjected to high-speed train loading. Specifically, it summarizes recent developments in experimental investigations, theoretical analyses, and influencing factors related to cumulative settlement, highlighting the complexity and key technical challenges associated with long-term subgrade deformation. Moreover, the paper outlines future research directions, including examining the effects of intermittent loading on long-term deformation, as well as investigating the particle breakage mechanism of subgrade fill materials and its impact on deformation behavior. This review aims to provide theoretical support for the design and opti-

收稿日期: 2024-11-14

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3009400); 国家自然科学基金项目(52168049)

mization of high-speed railway infrastructures.

Key words: high-speed railway subgrade; cumulative settlement; train load; experimental research; calculation model; discrete element method; intermittent load

Citation format: XU C J, GUAN L X, TONG L H, et al. Review on cumulative settlement of high-speed railway subgrade under train loading[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(2): 1–14.

高铁的发展及列车时速的提升对铁路下部结构变形及稳定性提出了更大挑战。除了桥隧工程这一重要的部分之外,路基也是高铁下部结构的重要组成部分。目前,有砟轨道和无砟轨道是国内外常见的高铁轨道结构^[1],两者的路基结构存在一定区别。如图1所示,有砟轨道将轨枕安置在石质散粒道砟上,列车荷载通过道砟层传递至下方的路基土体。而无砟轨道则取消了道砟层,使用混凝土底座与轨道板直接支撑路基基床上方的轨道结构,能够更有效地控制路基沉降。因此,无砟轨道凭借其高稳定性和优异的耐久性^[2],成为时速300 km/h及以上高铁的主要选择。然而,无砟轨道对路基的工后沉降控制要求较高,《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)规定,路基工后沉降的控制标准为总沉降不超过15 mm、差异沉降不超过5 mm。

相较于普通铁路,高铁显著提高了列车运输效率^[3],路基承受的列车荷载也成倍增加^[4]。在高频重复荷载的作用下,高铁路基不可避免地会产生累积塑性变形,导致轨道的不平顺性增加,甚至会损害线路结构而引起事故。因此,工后沉降已成为高铁路基设计中的主控因素^[5]。此外,随着国内多条高铁的建成与投入运营,当高铁运输网络趋近完善

时,路基的长期沉降及维护将成为一个新的研究热点。

高铁路基累积沉降研究有助于提前预测沉降趋势并采取必要的加固和维护措施。目前,中国在这一领域的研究尚不成熟,设计时多参考国外铁路建筑标准。因此,通过深入研究高铁路基在高速列车长期作用下的累积沉降规律,将为修订和完善高铁设计规范提供可靠的科学依据,对于保障高铁的安全性和可持续性发展具有重要意义^[6]。综上所述,研究高铁路基的长期累积沉降问题,不仅是完善我国高铁设计规范的关键,也是提升高铁技术水平的必要途径。

目前,国内外在高铁路基土体的变形特性方面已经积累了大量研究成果。本文从试验研究、理论研究、数值模拟,以及间歇荷载对路基累积沉降的影响4个方面对高铁路基长期沉降的国内外研究现状进行介绍。

1 试验研究

1.1 动三轴试验

动三轴试验是分析列车动荷载对路基土体变形特性影响的常见手段。为了使试验结果更接近

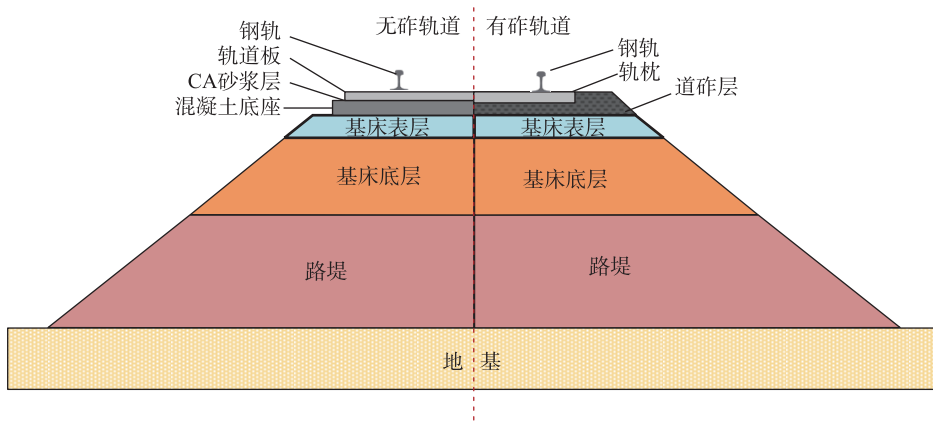


图1 高铁的典型路基-轨道结构

Fig. 1 Typical subgrade-track structure of high-speed railway

实际铁路路基的变形情况,准确模拟路基应力状态是必要的前提^[7]。在采用动三轴试验研究路基填料的变形和动力特性时,需要根据研究对象和研究重点对列车动荷载进行适度的简化处理。已有的三轴试验研究中,常用的列车动荷载模拟方式包括三角波、简谐波以及各种波形组合^[8-10]。大量的现场实测和数值模拟结果表明,实际路基表面的动态应力接近于简谐波形。黄博等^[11]比较了正弦波、半正弦波和实际列车动荷载波形下土体变形响应,指出在简化列车动态荷载时,只需关注实际存在的循环压应力。此外,路基在承受列车动态荷载时,还需考虑上覆土体、轨道结构和列车重量所引起的静态偏应力^[12]。Ng等^[13]探讨了细粒土在动态荷载作用下回弹模量和阻尼比的变化趋势。Lekarp等^[14]提出可以在三轴试验中施加同时变化的简谐轴压和围压,以模拟真实路基的应力状态。众多学者进行了双向简谐激振的动三轴试验,试验结果显示,双向激振条件下试样的变形更为显著,且其抵抗变形的能力明显降低^[15-17]。近年来的研究表明,在模拟实际路基的应力状态时,采用偏压动荷载和双相激振动三轴试验可以更准确地评估路基的变形特性和抗变形能力。

由于列车荷载经过时,路基土体单元的大主应力方向会发生旋转,这种效应在路基表层最为显著,并随土层深度增加而减弱^[18-19],而仅用传统的动三轴试验仪器无法施加剪切应力,不能精确模拟出主应力旋转。国内外学者采用了空心柱试验对此开展了研究工作^[20-21],试验结果发现土体在发生主应力旋转的情况下产生的累积变形更为显著,而传统设计方法常忽略主应力旋转,可能会导致设计结果不够安全。

本质上,由于室内试验存在着试验条件、时间和人力等限制,以及研究的侧重点不同,对实际路基应力状态的模拟无法面面俱到。例如,传统的动三轴试验通常采用连续循环加载方式来模拟列车荷载对路基土体的长期作用。然而,对于列车的间歇性运行方式,路基土体实际受到的动荷载具有间歇性的特点。因此,为了获得更为真实可靠的试验结论,室内试验需要尽可能地再现实际路基的受力情况,以达到更好地评估路基的变形特性和抗变形能力,为路基设计和维护提供可靠依据。

1.2 模型试验

高铁的整体结构是一个复杂耦合的系统,荷载与环境等因素均能影响路基的动态响应^[22]。现场测试是直接评估高铁结构系统在不同因素影响下动力响应的一种方法^[23],但它耗时长且数据相对有限。通过模型试验,可以模拟不同车型、速度和环境条件下的移动荷载,从而揭示高速铁路基及其他相关结构的一般规律和机理,进而更好地理解高铁结构系统的动态响应特性,评估不同参数对路基的影响,并优化设计和施工方案。模型试验方法通过控制荷载的变化来模拟不同情况下的影响,这既节省时间,又具有一定的可控性和可重复性,可以在相对较短的时间内获取大量数据,从而提供有力的支持和指导。虽然模型试验无法完全模拟真实的路况,但它仍然是研究高铁结构系统动力特性的重要手段之一。

国内外众多学者借助模型试验研究了高速铁路基的动力响应和累积变形。Anderson等^[24]开展了双层道砟物理模型试验,模拟了列车经过时的动荷载作用以及道砟的动力响应。Momoya等^[25]使用1:5的轨道-路基模型,分析了低速移动荷载下的应力分布和沉降规律。Shaer等^[26]采用比例为1:3的有砟轨道模型探讨了轨枕加速度对路基沉降的影响。Ishikawa等^[27]进行了1:5的有砟轨道模型试验和室内单元循环剪切实验,模拟了两种列车荷载对路基的作用。詹勇祥等^[28]开展了1:12的动力模型试验对遂渝高铁的板桩结构路基进行了模拟,研究了荷载频率与加载位置对路基变形的影响。Bian等^[29]运用全比尺高速铁路基模型试验系统研究了列车动荷载作用下路基和地基土体的累积沉降行为。蒋红光等^[30]模拟了不同速度的列车荷载作用下,轨道-路基各层结构的动力响应变化规律,并研究了路基土体在特定车速下的应力-应变滞回特征。杨果林等^[31]开展了1:1的高铁全比尺模型试验,分析了在不同环境条件下高铁膨胀土路基的动力响应。陈仁朋等^[32]通过室内试验研究路基内水位的变化对高铁无砟轨道变形的影响。石熊^[33]根据高速铁路基工程的实际尺寸与施工标准,填筑了全比尺无砟轨道路基模型,探究了10 000万轴次循环荷载作用下路基累积沉降的发展特性。吴龙梁等^[34]通过现场激振响应试验,研究了路基内部动力响应分量的衰减规律。孙广超等^[35]基于缩尺比

例为1:5模型试验,研究了X形桩-筏复合地基的动力响应。徐方等^[36]开展了预应力路基在不同列车荷载下的动力响应研究。此外,王启云等^[37-39]开展了一系列室内单元试验,研究循环荷载作用下粗粒土路基填料的颗粒破碎演化特征及其对累积变形的影响。

众多学者通过试验研究手段,对高铁路基的长期沉降问题进行了深入探索,取得了丰硕的研究成果,持续推动路基建设方案优化。未来的研究可集中在以下几个方面:深入研究颗粒破碎机制,以探索其与累积沉降的关系;应用新型试验方法,结合先进的监测技术提升对路基动态响应的实时分析能力;考虑列车荷载的间歇性特征及其对路基长期累积变形的影响,将为评估路基的耐久性提供更为精准的依据;综合考虑环境因素(如降雨-蒸发效应等)对路基沉降的影响;推动多学科交叉研究,结合地质学、材料学等领域的研究成果,综合分析影响路基沉降的多重因素。这些研究方向有望为高铁路基的安全性与可持续发展提供坚实的理论基础和技术支持。

2 累积沉降计算模型

2.1 经验模型

目前已有国内外众多学者对土体的累积变形预测进行了研究,表1给出了部分经典的累积沉降预测经验模型。 ε_p 为累积塑性应变; N 为荷载振动次数; σ_d 为动应力幅值; σ_s 为静偏应力; σ_r 为静强度; a 、 b 、 c 、 m 、 n 、 δ 均为待定参数。如表1所示,较早的经验模型是Monismith等^[40]的指数型模型,虽然简单实用,但力学机理不明确且存在局限性。因此,部分学者针对土体累积沉降特性逐步改进了经验模型。Li等^[41]分析大量试验后发现模型参数 b 和 A 分别与土体类型及应力状态存在显著关联,并基于此对指数模型进行改进。随后,Chai等^[42]进一步融入土体的应力状态,引入了初始静偏应力 σ_s 。Tang等^[43]和Fu等^[44]分别对考虑循环应力比(CSR)和等效循环数的预测模型进行了改进,提出了更加灵活的预测模型。张幸幸等^[45]基于等价黏弹塑性模型提出了交通荷载长期作用下的路基累积变形计算方法。姚仰平等^[46]提出了用于预测临线堆载下铁路路基变形的蠕变沉降算法。石熊^[33]基于模型试验结果,提出了考虑动静应力比、静应力与静强度

表1 土体累积沉降计算经验模型

Tab.1 Experiential models for calculating soil accumulated deformation

序号	经验公式	提出者
1	$\varepsilon_p = aN^b$	Monismith等 ^[40]
2	$\varepsilon_p = a\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s}\right)^m N^b$	Li等 ^[41]
3	$\varepsilon_p = a\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_r}\right)^m \left(1 + \frac{\sigma_s}{\sigma_r}\right)^n N^b$	Chai等 ^[42]

比以及振次的指数模型。总体而言,这些改进的预测模型旨在综合考虑主要因素对土体循环累积变形的影响。同时随着机器学习的发展,一些学者利用机器学习方法建立数学模型用于预测高铁路基的长期累积沉降^[47-48]。尽管经验模型的结构形式简单且计算高效,但随着荷载循环次数增加,这些经验公式能否持续准确预测变形发展尚不可知。

经验拟合法采用直观方式建立了累积塑性应变与振次等因素之间的函数关系。该方法通过调整拟合方程中的参数来反映其他影响因素对累积塑性应变的作用。由于其操作简便且适用性强,该方法在实际工程领域中获得了广泛的应用。传统的土体变形预测方法主要集中于评估动荷载作用下土体的累积应变,对于预测土体在重复荷载作用下的长期变形行为至关重要。然而,这些方法未能充分考虑动荷载作用下土体的动变形,无法准确反映路基在列车动荷载作用下的状态演化与长期变形特性。

2.2 理论模型

计算土体累积变形的理论模型通常是基于塑性增量理论^[49]建立的,通过考虑土体的屈服面、流动法则和硬化规律进行描述。黄茂松等^[50]针对粉细砂土的剪胀性和应变软化特性对剑桥模型进行了改进,提出了双屈服面模型。Bian等^[51]依据残余应变模型,开发了用于计算路基及地基土体累积变形的的方法。此外,基于安定性理论的弹塑性本构模型为研究土体在循环荷载下的累积变形提供了一种新思路。安定性理论^[52-55]适用于大步长大周期的塑性变形计算,只考虑最大塑性变形的包络线。Sharp等^[52]将此理论应用于道碴材料的累积变形分析中,并提出了具有一定经验性的双硬化弹塑性模型。林缘祥等^[56]改进了现有的静力安定理论和安定极限求解方法,引入了有效安定极限的概念。毕

宗琦等^[57]基于安定理论方法,提出了一种改进的动力安定分析算法,以控制非弹性变形,保证安全裕度。理论模型能够较为准确地描述土体在循环加载过程中的变形特性,但计算效率较低。

高铁路基是由粗粒土、砾石等颗粒材料作为填料填筑而成,长期列车循环荷载作用会导致其力学性质劣化,如模量软化、有效黏滞系数下降等^[58-59];同时,路基的变形对其系统力学性质也会产生影响,历史变形状态对当前变形的影响不可忽略。而现有累积变形计算模型很少考虑上述因素的影响,无法准确反映颗粒材料在列车荷载下的长期变形特性。Tong等^[60]基于颗粒材料的三轴试验数据分析,通过引入表征颗粒体系流动性的状态变量并考虑了历史应变对当前状态的影响,建立了能较准确地反映高铁路基填料在列车荷载作用下变形响应的状态演化本构模型

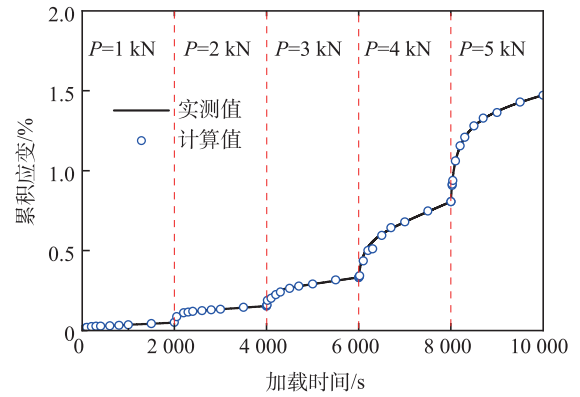
$$\begin{cases} \dot{\sigma} = -\theta\sigma + E\dot{\gamma} \\ \dot{\theta} = \frac{a_1}{\gamma_c} \dot{\gamma}^2 - \frac{\dot{\gamma}}{\gamma_c} \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{\sigma}$ 和 $\dot{\gamma}$ 分别为应力率与应变率; E 为弹性模量; θ 为状态变量,是控制颗粒系统流体黏度的关键函数; a_1 为待定参数; γ_c 与 $\dot{\gamma}_c$ 分别为特征应变和参考应变率。管凌霄等^[61]进一步采用有限差分法对状态演化模型进行时间离散并求解

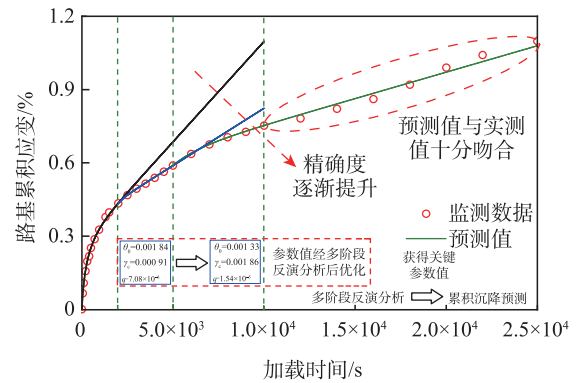
$$\begin{cases} \gamma_{i+1} = \frac{\dot{\sigma}_i + \theta_i \sigma_i}{E} \Delta t + \gamma_i \\ \theta_{i+1} = k_i \frac{\Delta t}{\gamma_c} \frac{\dot{\sigma}_i + \theta_i \sigma_i}{E} + \theta_i \\ k_i = q \frac{\dot{\sigma}_i + \theta_i \sigma_i}{E} - \theta_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: q 为特征系数, $q = a_1/\dot{\gamma}_c$; $i=0,1,2,\dots,n$ 。此外,管凌霄等^[61]采用室内路基模型的分级加载与长期加载试验结果验证了状态演化模型的准确性(图2)。

近年来,还有学者们提出了力学-经验型模型,考虑土体应力状态点与破坏线的关系,以量化描述土体产生塑性变形的难易程度,并实现综合计算。比如,Gidel等^[62]基于循环三轴试验结果和Hornych等^[63]的模型,引入了描述土体应力状态的函数建立了新的累积应变计算公式。Gu等^[64]通过试验结果研究了土体应力状态与破坏线在应力不变量空间内的关系。Chow等^[65]则基于剪切应力比,提出了在应力平面内描述土体应力状态与破坏线关系的



(a) 分级加载试验结果对比



(b) 长期加载试验结果对比

图2 状态演化模型的验证

Fig. 2 Verification of state evolution model

力学-经验模型。力学-经验模型明确了应力空间内土体应力状态点与破坏线相对位置的影响,使模型具备更好的理论基础。在计算效率和理论基础方面较经验模型有明显改进,但力学-经验模型仍然依赖于经验模型,无法揭示土体变形规律的内在机理,且无法合理描述土体结构和应力状态随加载变化的情况。此外,现有模型往往忽略了高铁列车间歇荷载及其对路基土体状态演化的影响^[66],故难以保证长期准确性。因此,在路基长期沉降计算模型的研究领域还需要改进和完善其理论基础,并解决其存在的不足之处。

3 路基颗粒细观研究

对于高铁路基中的颗粒体材料而言,滑动、错位及破碎等细观力学行为对路基累积变形起着重要作用。然而,传统的模型试验和力学-经验模型并不能有效分析路基颗粒的细观力学行为。基于此,Cundall等^[67]建立的离散元方法(discrete ele-

ment method, DEM)提供了一种有效的途径来模拟颗粒材料的细观力学特性,并研究其对累积变形的影响。因此,DEM已成为研究路基填料细观力学特性的主要技术方法^[68]。

何忠明等^[69]采用PFC 3D软件建立了粗粒土路堤填料的三轴试验离散元模型,研究了粗粒土在不同含水率下的力学特性。尽管有大量学者已经使用离散元软件模拟了三轴试验,但由于这种模拟通常采用刚性墙的径向移动来施加围压,无法产生变形。与之相对的是,传统的室内三轴试验通过较为柔软的橡胶膜将围压传递给试样,允许其产生不均匀的径向变形,因此使用刚性墙施加围压不能有效地再现三轴试验。为改进这一局限,部分学者转而使用柔性黏结颗粒^[70-73]或分段组合刚性墙体^[74-75]来代替传统的圆柱形墙体模拟橡胶膜的柔性伺服边界。虽然黏结颗粒模拟柔性边界能较好地反映试样的实际变形,但在大变形时难以维持均匀的围压,同时,颗粒数量的增加也使得建模和控制变得更加复杂;多段分层墙体建模复杂,在施加围压过程中只能沿水平方向移动,也难以完全模拟实际情况。随着PFC-FLAC耦合建模方法的提出,可以在模拟中用FLAC的结构体替代PFC的刚性墙,有效克服了以往方法的局限性^[76]。胡世兴等^[77]和张杰等^[78]采用PFC-FLAC耦合建模方法建立了柔性伺服三轴加载模型,探讨了不同土体试样变形的细观行为特征。

此外,近年来研究人员发现颗粒破碎对路基劣化具有重要影响,为了研究粗粒土在受力作用下的破碎特性,基于DEM模拟颗粒破碎的主要途径有两种:碎片替换法和颗粒黏结法。徐琨等^[79]和Brosh等^[80]分别基于两种不同的碎片替换模式,用于开展精细模拟研究和微粒子的冲击破碎。此外,McDowell团队^[81-84]、Indraratna团队^[85-89]和Tutumluer团队^[90-93]等采用DEM开展了一系列工作,研究内容包括模拟单颗粒压碎过程、分析单轴和三轴循环荷载下的颗粒弹性模量与累积变形,探讨土工格栅和枕下垫板对颗粒力学性能的影响,以及模拟过渡段道床的动态行为等。程世涛^[94]基于PFC软件针对粗粒土开展了三轴试验的离散元模拟,分析了颗粒破碎及其对土体力学特性的影响。谢康等^[95]采用PFC软件模拟了级配碎石在振动压实过程中的颗粒破碎,揭示了其对级配碎石力学性能的影响

机制。徐林荣等^[96]通过DEM研究了可破碎宕渣的颗粒破碎及其与累积变形之间的关系。这些研究在颗粒材料破碎的模拟及其对累积变形影响的规律方面取得了显著进展。

从现有的研究成果来看,路基填料颗粒的破碎主要经历两个阶段:一是在填筑期间的压密作用下,颗粒因达到极限承载能力而发生的即时破碎;二是长期列车循环荷载导致的颗粒疲劳破碎^[97]。每个阶段的颗粒破碎行为对路基的沉降和稳定性都有显著影响,特别是在长期列车荷载下,颗粒破碎可能会加剧累积沉降,从而影响轨道结构的平顺性。然而,道砟和路基填料颗粒的破碎机制十分复杂,涉及多种因素的共同作用,包括颗粒的粒径分布、级配特性、颗粒形貌、加载条件(如荷载大小、频率、作用时间)以及环境条件。这些因素不仅影响颗粒的破碎程度,还影响破碎后颗粒重新排列对路基整体力学性能的贡献。如何通过优化填料的级配、控制压实参数以及合理设计荷载条件,以减少颗粒破碎并降低累积沉降,仍是学者们需进一步深入探讨的课题。

4 列车间歇荷载的影响

在高铁运营过程中,铁路路基承受的动荷载作用主要集中在某些时间段,属于间歇性荷载(如图3)。然而目前大部分研究通常采用连续加载的模型来模拟列车运行对路基的影响,这种方法可能无法准确反映实际工况下荷载的间歇性特征。故针对少数学者开展列车间歇荷载对土体累积沉降影响的研究现状与结论进行介绍,以此说明间歇性荷载对高速铁路长期沉降的影响。

王军等^[98]的研究表明,在间歇阶段,在不排水条件下土体内部超孔隙水压力基本不变,且试样会产生回弹变形;而在排水条件下,超孔隙水压力会完全消散,土体变形不会产生回弹。有学者通过动三轴试验分析了阶段性加载与排水对土体长期固结变形的影响,揭示了加载后排水能增强土体抗动荷载的能力^[99-100]。Yildirim等^[101]的试验结果表明,间歇阶段不仅能够消散超孔隙水压力,还能提升土体的抵抗变形能力。郑晴晴等^[102-104]关于间歇加载下土体刚度软化现象的研究指出,在加载初期,间歇阶段加剧了软化效应,而在加载后期,则有助于减弱软化效应。李亚峰等^[105-106]开展了一系列连续

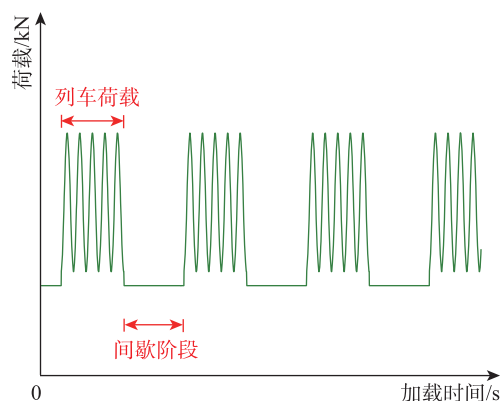
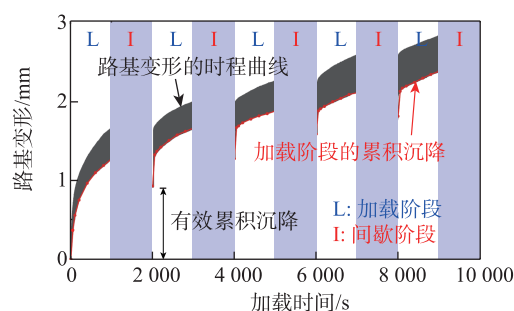


图3 列车荷载示意图

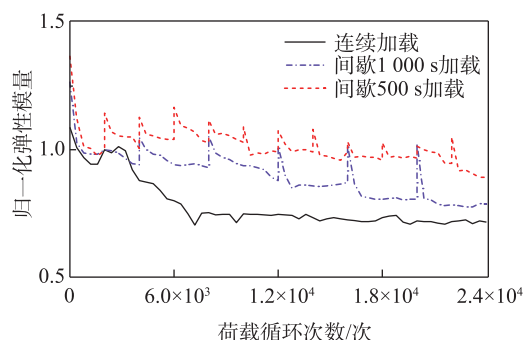
Fig. 3 Schematic diagram of train load

加载,以及加载-停振的动三轴试验,试验结果表明土体内的颗粒结构在间歇阶段发生了调整,从而增强了土体对后续荷载的抵抗力。此外,加载的间歇性显著延缓了随后加载阶段塑性应变的增长,并减少了土体的累积塑性应变。童立红等^[107]通过共振柱试验研究了间歇荷载作用下土体的模量变化规律。Nie等^[108]和Tong等^[109]发现间歇加载阶段,试件的累积塑性应变减小,表明增加间歇加载时间可以增强试样抗动加载变形的能力。Guan等^[110]开展了间歇荷载下高铁路基长期沉降的1:7缩尺模型试验,发现在间歇加载阶段路基变形出现反弹,累积沉降减小(如图4(a))。此外,根据试验结果分析可得,与连续加载相比,间歇加载时的路基弹性模量的减小速率明显更慢,这表明间歇荷载下的路基土体展现出了更强的抗“软化”能力(如图4(b))。

综上所述,间歇荷载作用下,路基土体的应力-应变响应、超孔隙水压力的变化以及累积塑性变形等特性可能与连续加载情况有显著差异。这些差异可能对路基的长期行为和安全性产生重要影响。例如,间歇荷载使得路基在加载阶段和间歇段表现出不同的变形特性,忽略相邻列车运行时间间隔采用连续加载方式模拟列车荷载会导致土体变形被高估,路基承载能力被低估。研究间歇荷载对路基土体的影响将有助于改进现有的路基设计和养护策略,提高路基工程的可靠性和养护效率。此外,这项研究还将为路基材料的选用、路基结构的优化设计以及风险评估的制定提供科学依据。因此,理解间歇荷载下路基的累积沉降行为对于预测和保障高铁的运行安全至关重要。



(a) 路基表面弹性模量随振次的变化



(b) 路基表面弹性模量随振次的变化

图4 间歇荷载下路基模型试验结果

Fig. 4 Results of subgrade model test under intermittent load

5 结束语

经多年不断发展,国内外学者在高铁路基长期沉降问题上开展了广泛的研究,并取得了显著成果。目前,针对该问题的研究仍存在不足,推动该领域发展可从以下几个方面寻求突破。

1) 现有的路基模型试验和累积变形理论计算模型普遍忽略了高铁列车间歇性荷载对路基土体状态演化和变形的显著影响。鉴于高铁列车运行的时间间隔特性,建议开展针对实际间歇性高铁列车荷载的模型试验,并构建考虑间歇荷载影响的路基状态演化累积应变预测模型,以更准确地评估列车荷载对路基变形和长期稳定性的影响。

2) 路基颗粒破碎对其长期沉降有着显著影响,不同内在(颗粒级配、压实度等)和外在(荷载、温湿度等)因素对颗粒破碎的影响机制仍不够明晰。为了优化路基设计,有必要针对该课题开展进一步的探讨。

3) 目前在不同环境因素影响下的路基长期沉降研究仍不充分。例如交通荷载与降雨耦合作用下路基沉降的机理和预测、降雨导致路基内部细粒土迁移规律不清、微观与宏观力学行为之间的关联

复杂等问题尚未明确。为更好地评估路基的长期性能,建议深入研究动载和降雨耦合作用下的路基填料的微观和宏观力学特性,以及降雨-蒸发等环境因素对路基变形时空演化的影响。

参考文献:

- [1] 陈云敏, 边学成. 高速铁路路基动力学研究进展[J]. 土木工程学报, 2018, 51(6): 1-13.
CHEN Y M, BIAN X C. The review of high-speed railway track foundation dynamics[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(6): 1-13.
- [2] 朱永见. CRTS II 型板式轨道的纵连特性对温度效应的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
ZHU Y J. Study on the influence of longitudinal characteristic of CRTS II slab track on temperature effect[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [3] 林立, 孟学雷, 高如虎, 等. 基于多尺度动态时空神经网络的 OD 客流预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(12): 4924-4935.
LIN L, MENG X L, GAO R H, et al. OD passenger flow prediction based on multi-scale dynamicspatio-temporal neural network[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(12): 4924-4935.
- [4] 宋安祥, 姚国文, 刘佳伟, 等. 温度与列车荷载作用下高速铁路无砟轨道力学性能研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(5): 125-146.
SONG A X, YAO G W, LIU J W, et al. Research progress on mechanical properties of high-speed railway ballastless track under temperature and vehicle load[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English), 2023, 45(5): 125-146.
- [5] 刘魁. 沟谷型黄土高填方地基工后沉降预测与地基处治 [D]. 西安: 长安大学, 2023.
LIU K. Post-construction settlement prediction of gully-type loess high-fill foundation and foundation treatment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [6] 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.
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.
- [7] CERNI G, CARDONE F, VIRGILI A, et al. Characterisation of permanent deformation behaviour of unbound granular materials under repeated triaxial loading[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 79-87.
- [8] INDRARATNA B, SINGH M, NGUYEN T T, et al. Laboratory study on subgrade fluidization under undrained cyclic triaxial loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(11): 1767-1779.
- [9] TANG L, YAN M H, LING X Z, et al. Dynamic behaviours of railway's base course materials subjected to long-term low-level cyclic loading: experimental study and empirical model[J]. Géotechnique, 2017, 67(6): 537-545.
- [10] LENG W M, XIAO Y J, NIE R S, et al. Investigating strength and deformation characteristics of heavy-haul railway embankment materials using large-scale undrained cyclic triaxial tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(9): 04017074.
- [11] 黄博, 丁浩, 陈云敏. 高速列车荷载作用的动三轴试验模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 195-202.
HUANG B, DING H, CHEN Y M. Simulation of high-speed train load by dynamic triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 195-202.
- [12] 臧濛, 孔令伟, 郭爱国. 静偏应力下湛江结构性黏土的动力特性[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 33-40.
ZANG M, KONG L W, GUO A G. Effects of static deviatoric stress on dynamic characteristics of Zhanjiang structured clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 33-40.
- [13] NG C W W, ZHOU C, YUAN Q, et al. Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(2): 223-232.
- [14] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A. State of the art I: resilient response of unbound aggregates[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, 126(1): 66-75.
- [15] 王军, 蔡袁强, 丁光亚, 等. 双向激振下饱和软黏土动模量与阻尼变化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 423-432.
WANG J, CAI Y Q, DING G Y, et al. Experimental research on changing rules of dynamic modulus and damping ratio of saturated soft clay under bidirectional exciting cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 423-432.
- [16] HU X Q, ZHANG Y, GUO L, et al. Cyclic behavior of saturated soft clay under stress path with bidirectional shear stresses[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 104: 319-328.
- [17] SUN Q, DONG Q, CAI Y Q, et al. Modeling permanent strains of granular soil under cyclic loading with variable confining pressure[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(5): 1005-1015.

- 1409-1421.
- [18] BROWN S R. Soil mechanics in pavement engineering [J]. *Geotechnique*, 1996, 46(3): 384-426.
- [19] 邓鹏, 郭林, 蔡袁强, 等. 循环荷载下考虑主应力旋转的软土力学响应研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(S2): 148-156.
DENG P, GUO L, CAI Y Q, et al. Research on mechanical response of soft clay under cyclic loading involving principal stress rotation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S2): 148-156.
- [20] 严佳佳, 李伯安, 陈利明, 等. 原状软黏土各向异性及其对工程影响研究[J]. *西北地震学报*, 2011, 33(S1): 155-159.
YAN J J, LI B A, CHEN L M, et al. Anisotropy of undisturbed soft clay and its influence on practical engineering [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, 33(S1): 155-159.
- [21] HUANG M S, LIU Y H. Experimental investigation and three-dimensional constitutive modeling of principal stress rotation in shanghai soft clay[J]. *Constitutive Modeling of Geomaterials*, 2012, 4: 567-575.
- [22] 冯佳伟. 高速列车动荷载和干湿循环作用下高铁路基稳定性模型试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
FENG J W. Investigation on stability of high speed railway embankment under wetting-drying and dynamic load using model test[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2020.
- [23] 王成功, 杨国涛. 列车移动荷载与非一致地震动作用下轨道-路基系统动力响应[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(18): 297-305.
WANG C G, YANG G T. Dynamic response of a track-subgrade system under moving train loads and non-uniform ground motions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(18): 297-305.
- [24] ANDERSON W F, KEY A J. Model testing of two-layer railway track ballast[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(4): 317-323.
- [25] MOMOYA Y, SEKINE E, TATSUOKA F. Deformation characteristics of railway roadbed and subgrade under moving-wheel load[J]. *Soils and Foundations*, 2005, 45(4): 99-118.
- [26] SHAER A A, DUHAMEL D, SAB K, et al. Experimental settlement and dynamic behavior of a portion of ballasted railway track under high-speed trains[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 316(1): 211-233.
- [27] ISHIKAWA T, SEKINE E, MIURA S. Cyclic deformation of granular material subjected to moving-wheel load [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(5): 691-703.
- [28] 詹永祥, 蒋关鲁, 牛国辉, 等. 高速铁路无砟轨道桩板结构路基模型试验研究[J]. *西南交通大学学报*, 2007, 42(4): 400-403.
ZHAN Y X, JIANG G L, NIU G H, et al. Model test investigation of pile-plank embankment of ballastless track for high-speed railway[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2007, 42(4): 400-403.
- [29] BIAN X C, JIANG H G, CHEN Y M, et al. A full-scale physical model test apparatus for investigating the dynamic performance of the slab track system of a high-speed railway[J]. *Journal of Rail & Rapid Transit*, 2016, 230: 554-571.
- [30] 蒋红光, 边学成, 陈云敏, 等. 高速铁路轨道-路基列车移动荷载模拟的全比尺加速加载试验[J]. *土木工程学报*, 2015(9): 85-95.
JIANG H G, BIAN X C, CHEN Y M, et al. Full-scale accelerated testing for simulation of train moving loads in track-subgrade system of high-speed railways[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015(9): 85-95.
- [31] 杨果林, 王亮亮, 杨啸. 不同服役环境下高速铁路膨胀土路堑基床振动特性模型试验 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(1): 133-138.
YANG G L, WANG L L, YANG X. Model tests on vibration characteristics of cutting subgrade of expansive soil of express railways under different service environments [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(1): 133-138.
- [32] 陈仁朋, 赵星, 蒋红光, 等. 水位变化对无砟轨道路基变形特性影响的研究[J]. *铁道学报*, 2014, 36(3): 87-93.
CHEN R P, ZHAO X, JIANG H G, et al. Model test on deformation characteristics of slab track-subgrade under changes of water level[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(3): 87-93.
- [33] 石熊. 高速铁路路基动力累积变形模型试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(6): 1346-1355.
SHI X. The model test of dynamic accumulative deformation of high-speed railway track foundation[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(6): 1346-1355.
- [34] 吴龙梁, 于琦, 江辉煌, 等. 高铁路基在振动荷载下的空间动态响应特性试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(4): 799-807.
WU L L, YU Q, JIANG H L, et al. Experimental study on spatial characteristics of dynamic responses of high-speed railway subgrade under vibrational loading[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(4): 799-807.

- [35] 孙广超, 李建林, 孔纲强, 等. 长期列车荷载下无砟轨道 X 形桩-筏复合地基动力响应模型试验[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 961-969.
- SUN G C, LI J L, KONG G Q, et al. Model tests on dynamic response of ballastless track X-shaped pile-raft foundation under long-term train loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 961-969.
- [36] 徐方, 董俊利, 冷伍明, 等. 重载列车荷载下新型预应力路基的加速度响应试验研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(10): 149-159.
- XU F, DONG J L, LENG W M, et al. Experimental study on acceleration response of a new prestressed subgrade under heavy-haul train load[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(10): 149-159.
- [37] 王启云, 肖南雄, 张丙强, 等. 高速铁路路基粗粒土填料颗粒破碎演化特征研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1071-1080.
- WANG Q Y, XIAO N X, ZHANG B Q, et al. Evolution of particle breakage properties for coarse-grained soil filling of subgrade of high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5): 1071-1080.
- [38] 王启云, 魏心星, 张丙强, 等. 高速列车荷载作用下粗粒土填料累积变形试验研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(3): 149-157.
- WANG Q Y, WEI X X, ZHANG B Q, et al. Experimental study on accumulated deformation of coarse grained soli fill under high-speed train load[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(3): 149-157.
- [39] 王启云, 肖南雄, 张丙强, 等. 考虑颗粒破碎效应的粗粒土填料累积变形试验研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(8): 117-124.
- WANG Q Y, WEI X X, ZHANG B Q, et al. Experimental study on accumulated deformation of coarse grained soli fill under high-speed train load[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(3): 149-157.
- [40] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soil due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975, 537: 1-17.
- [41] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006-1013.
- [42] 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.
- [43] TANG L, YAN M H, LING X Z, et al. Dynamic behaviours of railway's base course materials subjected to long-term low-level cyclic loading: experimental study and empirical model[J]. Géotechnique, 2017, 67(6): 1-9.
- [44] FU Z, WANG G, SONG W, et al. Deformation behavior of saturated soft clay under cyclic loading with principal stress rotation[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 8987.
- [45] 张幸幸, 张建民, 温彦锋. 长期交通荷载作用下路基沉降的实用计算方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2067-2072.
- ZHANG X X, ZHANG J M, WEN Y F. Practical method to predict settlement of subgrade induced by long-term traffic loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2067-2072.
- [46] 姚仰平, 王琬, 王乃东, 等. 临线堆载影响下高速铁路基长期沉降预测方法[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 625-630.
- YAO Y P, WANG S, WANG N D, et al. Prediction method for long-term settlements of high-speed railway subgrade under influences of nearby loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 625-630.
- [47] 张献州, 夏晨翕, 陈霄, 等. IGM-FM 串联模型在高速铁路基沉降预测中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(11): 99-108.
- ZHANG X Z, XIA C X, CHEN X, et al. Application of series IGM-FM combination model in prediction of subgrade settlement of high-speed railway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(11): 99-108.
- [48] 涂仁盼, 冷伍明, 聂如松, 等. 朔黄重载铁路某路桥过渡段沉降监测及预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1412-1419.
- TU R P, LENG W M, NIE R S, et al. Monitoring and prediction for a bridge-subgrade transition zone settlement of Shuo-Huang heavy haul railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1412-1419.
- [49] 胡永利, 邬智峰, 张东杰, 等. 长期循环荷载下粗粒土应变累积与塑性安定准则研究[J]. 地震工程与工程振动, 2025, 45(1): 103-112.
- HU Y L, WU Z F, ZHANG D J, et al. Strain accumulation and plastic shakedown criterion of coarse-grained soil under long-term cyclic loading[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2025, 45(1): 103-112.
- [50] 黄茂松, 扈萍, 张宏博. 考虑剪胀性和应变软化的粉细砂双屈服面本构模型[J]. 水利学报, 2008(2): 129-136.
- HUANG M S, HU P, ZHANG H B. Two-yield surface constitutive model for fine sand in consideration of dilat-

- ancy and strain softening[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008(2): 129-136.
- [51] BIAN X C, JIANG H G, SHEN W M, et al. Study of accumulative deformation of high-speed railways based on physical model testing[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(6): 112-119.
- [52] SHARP R, BOOKER J. Shakedown of pavements under moving surface loads[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1984, 110(1): 1-14.
- [53] XIAO Y, ZHENG K, CHEN L, et al. Shakedown analysis of cyclic plastic deformation characteristics of unbound granular materials under moving wheel loads[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 457-472.
- [54] 聂如松, 李亚峰, 冷伍明, 等. 列车间歇荷载作用下路基细粒土填料的塑性变形行为及临界动应力研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(4): 828-841.
- NIE R S, LI Y F, LENG W M, et al. Plastic deformation and critical dynamic stress of fine-grained soils under intermittent loading of trains[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(4): 828-841.
- [55] KARG C, FRANCOIS S, HAEGEMAN W, et al. Elastoplastic long-term behavior of granular soils: modelling and experimental validation[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2010, 30(8): 635-646.
- [56] 林缘祥, 郑俊杰, 后如意, 等. 移动简谐荷载作用下层状道路结构的安定下限分析[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(11): 2026-2034.
- LIN Y X, ZHENG J J, HOU R Y, et al. Lower shakedown limits of layered road structures under moving harmonic loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(11): 2026-2034.
- [57] 毕宗琦, 叶阳升, 蔡德钧, 等. 基于残余应力模拟的高速铁路路基动力安定分析算法[J]. *铁道建筑*, 2022, 62(4): 107-111.
- BI Z Q, YE Y S, CAI D G, et al. Dynamic shakedown analysis algorithm of high speed railway subgrade based on residual stress simulation[J]. *Railway Engineering*, 2022, 62(4): 107-111.
- [58] TONG L H, QI B W, XU C J. Fluidity characteristic of granular materials within low frequency dynamics[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021: 106508.
- [59] TONG L H, QI B, DING H, et al. Statistical model predicts softening and fluidization induced by vibration in granular materials[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 171: 105373.
- [60] TONG L H, WU B N, LEI Z X, et al. Unified creeping model identifying the critical state of granular materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2022(5): 132.
- [61] 管凌霄, 童立红, 徐长节, 等. 基于状态演化模型的高铁路基动力累积沉降变形预测研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(5): 1714-1725.
- GUAN L X, TONG L H, XU C J, et al. Prediction of cumulative settlement deformation in high-speed railway subgrades based on state evolution model[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(5): 1714-1725.
- [62] GIDEL G, BREYSSE D, HORNYCH P, et al. A new approach for investigating the permanent deformation behavior of unbound granular material using the repeated load triaxial apparatus[J]. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 2001, 233: 5-21.
- [63] HORNYCH P, CORTE J F, PAUTE J L. Etude des déformations permanentes sous chargements répétés de trois graves non traitées[J]. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1993, 184: 45-55.
- [64] GU F, ZHANG Y, DRODDY C V, et al. Development of a new mechanistic empirical rutting model for unbound granular material[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(8): 04016051.
- [65] CHOW L C, MISHRA D, TUTUMLUER E. Framework for development of an improved unbound aggregate base rutting model for mechanistic-empirical pavement design[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2014, 2401: 11-21.
- [66] 刘家顺, 任钰, 朱开新, 等. 间歇性循环荷载下冻融风积土变形特性及分数阶预测模型[J]. *工程力学*, 2024, 41(10): 89-99.
- LIU J S, REN Y, ZHU K X, et al. Deformation characteristics of freezing-thawing aeolian soil under intermittent cyclic load and its fractional-order prediction model[J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(10): 89-99.
- [67] CUNDALL P A, STRACK O D. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(1): 47-65.
- [68] 谢康, 陈晓斌, 尧俊凯, 等. 基于粗颗粒动态演化过程的高铁填料振动压实机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(4): 803-813.
- XIE K, CHEN X B, YAO J K, et al. Vibration compaction mechanism of high-speed railway fillers based on dynamic evolution of coarse particles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(4): 803-813.
- [69] 何忠明, 黄超, 刘雅欣, 等. 粗粒土路堤填料力学特性及其细观模拟研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(4): 1116-1124.

- HE Z M, HUANG C, LIU Y X, et al. Study on mechanical properties and mesoscopic simulation of coarse-grained soil subgrade[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(4): 1116-1124.
- [70] CIL M B, ALSHIBLI K A. 3D analysis of kinematic behavior of granular materials in triaxial testing using dem with flexible membrane boundary[J]. *Acta Geotechnica: An International Journal for Geoengineering*, 2014, 9(2): 287-298.
- [71] LI Z, CHOW J K, LI J, et al. Modeling of flexible membrane boundary using discrete element method for drained/undrained triaxial test[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 145: 104687.
- [72] 张强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 基于围压柔性加载的土石混合体大型三轴试验离散元模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(8): 1545-1554.
- ZHANG Q, WANG X G, ZHAO Y F, et al. Discrete element simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixtures based on flexible loading of confining pressure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(8): 1545-1554.
- [73] 刘操. 基于PFC3D柔性边界条件的饱和密实含泥砂土动力特性模拟分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- LIU C. Numerical simulations of dynamic characteristics for saturated compacted clayey sands based on PFC3D with the flexible boundary conditions[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [74] ZHAO X, EVANS T M. Discrete simulations of laboratory loading conditions[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2009, 9(4): 169-178.
- [75] 金磊, 曾亚武. 土石混合体宏观力学特性和变形破坏机制的三维离散元精细模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(6): 1540-1550.
- JIN L, ZENG Y W. Refined simulation for macro-and meso-mechanical properties and failure mechanism of soil-rock mixture by 3D DEM[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1540-1550.
- [76] ZHU H, YIN Z, ZHANG Q. A novel coupled FDM-DEM modelling method for flexible membrane boundary in laboratory tests[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2020, 44(3): 389-404.
- [77] 胡世兴, 靳晓光, 孙国栋, 等. 土石混合体材料大型三轴试验及PFC-FLAC耦合仿真研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(S2): 3344-3356.
- HU S X, JIN X G, SUN G D, et al. Triaxial test and PFC-FLAC coupling simulation study on material parameters and deformation characteristics of soil-rock mixture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(S2): 3344-3356.
- [78] 张杰, 聂如松, 李列列, 等. 基于柔性边界的非饱和土三轴试验及离散元分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2024, 32(1): 208-222.
- ZHANG J, NIE R S, LI L L, et al. Discrete element analysis of triaxial test of unsaturated soil based on flexible boundary conditions[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, 32(1): 208-222.
- [79] 徐琨, 周伟, 马刚等. 基于离散元法的颗粒破碎模拟研究进展[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(5): 880-889.
- XU K, ZHOU W, MA G, et al. Review of particle breakage simulation based on DEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(5): 880-889.
- [80] BROSH T, KALMAN H, LEVY A. Fragments spawning and interaction models for DEM breakage simulation[J]. *Granular Matter*, 2011, 13(6): 765-776.
- [81] LU M, MCDOWELL G R. Discrete element modelling of railway ballast under monotonic and cyclic triaxial loading[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(6): 459-467.
- [82] CHEN C, MCDOWELL G, THOM N H. Discrete element modelling of cyclic loads of geogrid-reinforced ballast under confined and unconfined conditions[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 35: 76-86.
- [83] CHEN C, MCDOWELL G R. An investigation of the dynamic behaviour of track transition zones using discrete element modelling[J]. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 23(1): 117-128.
- [84] LI H, MCDOWELL G R. Discrete element modelling of under sleeper pads using a box test[J]. *Granular Matter*, 2018, 20(2): 1-12.
- [85] INDRARATNA B, NGO N T, RUJIKIATKAMJORN C. Deformation of coal fouled ballast stabilized with geogrid under cyclic load[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(8): 1275-1289.
- [86] INDRARATNA B, NGO N T, RUJIKIATKAMJORN C, et al. Behavior of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing: discrete element simulation[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2014, 14(1): 34-44.
- [87] INDRARATNA B, NGO N T, RUJIKIATKAMJORN C. Improved performance of ballasted rail tracks using plastics and rubber inclusions[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 189: 207-214.
- [88] NGO N T, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Micromechanics-based investigation of fouled ballast us-

- ing large-scale triaxial tests and discrete element modeling[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(2): 4016089.
- [89] INDRARATNA B, QI Y, NGO T N, et al. Use of geogrids and recycled rubber in railroad infrastructure for enhanced performance[J]. *Geosciences*, 2019, 9(1): 1-26.
- [90] HUANG H, TUTUMLUER E. Discrete element modeling for fouled railroad ballast[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(8): 3306-3312.
- [91] QIAN Y, LEE S J, TUTUMLUER E, et al. Discrete element method for simulating ballast shear strength from large-scale triaxial tests[J]. *Transportation Research Record*, 2013, 2374: 126-135.
- [92] HOU W, FENG B, LI W, et al. Evaluation of ballast behavior under different tie support conditions using discrete element modeling[J]. *Transportation Research Record*, 2018, 2672(10): 106-115.
- [93] QIAN Y, LEE S J, TUTUMLUER E, et al. Role of initial particle arrangement in ballast mechanical behavior[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(3): 4017158.
- [94] 程世涛. 粗粒土颗粒剪切破碎特性及其对强度影响的三轴细观数值试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- CHENG S T. Meso-numerical study of triaxial tests on the particle breakage properties of coarse-grained soil under shearing and its influence on strength[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [95] 谢康, 陈晓斌, 尧俊凯, 等. 高铁级配碎石振动压实下力学机制演化与颗粒破碎研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(9): 3217-3228.
- XIE K, CHEN X B, YAO J K, et al. Mechanical evolution and particle crushing under vibration compaction of graded gravel fill for high-speed railway[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(9): 3217-3228.
- [96] 徐林荣, 陆志强, 陈昀灏, 等. 循环荷载作用下岩渣颗粒破碎行为及累积变形预测[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(1): 102-113.
- XU L R, LU Z Q, CHEN Y H, et al. Crushing behavior and cumulative deformation prediction of slag particles under cyclic loading [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2023, 53(1): 102-113.
- [97] 边疆, 徐鹏程, 张东. 列车荷载作用下道砟材料的累积变形和破碎规律[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(2): 261-268.
- BIAN J, XU P C, ZHANG D. Accumulated deformation and broken rules of ballast materials under train load[J]. *Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition)*, 2019, 41(2): 261-268.
- [98] 王军, 蔡袁强, 郭林, 等. 分阶段循环加载条件下温州饱和软黏土孔压和应变发展规律[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(7): 1349-1354.
- WANG J, CAI Y Q, GUO L, et al. Pore pressure and strain development of Wenzhou saturated soft soil under cyclic loading by stages[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(7): 1349-1354.
- [99] YASUHARA K, YAMANOUCI T, HIRAO K. Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay [J]. *Soils and Foundations*, 1982, 22(3): 77-91.
- [100] YASUHARA K, ANDERSEN K H. Recompression of normally consolidated clay after cyclic loading[J]. *Soils and Foundations*, 1991, 31(1): 83-94.
- [101] YILDIRIM H, ERSAN H. Settlements under consecutive series of cyclic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27(6): 577-585.
- [102] 郑晴晴, 夏唐代, 张孟雅. 考虑间歇效应的循环荷载下软黏土刚度软化特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(11): 88-96.
- ZHENG Q Q, XIA T D, ZHANG M Y. Stiffness degradation of soft clay under cyclic loading considering intermittency effect[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(11): 88-96.
- [103] 郑晴晴, 夏唐代, 张孟雅, 等. 间歇性循环荷载下原状淤泥质软黏土应变预测模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(5): 889-898.
- ZHENG Q Q, XIA T D, ZHANG M Y, et al. Strain prediction model of undisturbed silty soft clay under intermittent cyclic loading[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(5): 889-898.
- [104] 夏唐代, 郑晴晴, 陈秀良. 基于累积动应力水平的间歇加载下超孔压预测[J]. *岩土力学*, 2019, 40(4): 1483-1490.
- XIA T D, ZHENG Q Q, CHEN X L. Predicting excess pore water pressure under cyclic loading with regular intervals based on cumulative dynamic deviator stress level[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(4): 1483-1490.
- [105] 李亚峰, 聂如松, 冷伍明, 等. 间歇性循环荷载作用下细粒土的变形特性[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(11): 2109-2119.
- LI Y F, NIE R S, LENG W M, et al. Deformation characteristics of fine-grained soil under cyclic dynamic loading with intermittence[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 54(11): 2109-2119.
- [106] 李亚峰. 考虑荷载间歇和上覆道砟作用的重载铁路路基粉土填料变形特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.

LI Y F. Research on deformation characteristics of silty filler for heavy-haul railway subgrade considering loading intermittence and overlying ballast action[D]. Changsha: Central South University, 2022.

- [107] 童立红, 薛威, 徐长节, 等. 间歇振动荷载致黏土刚度软化试验研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(9): 8-15.

TONG L H, XUE W, XU C J, et al. Experimental study on stiffness softening of clay under intermittent vibration loads[J]. Journal of Railway Engineering, 2023, 40(9): 8-15.

- [108] NIE R S, LI Y F, LENG W M, et al. Deformation characteristics of fine-grained soil under cyclic loading with intermittence[J]. Acta Geotechnica, 2020(15): 3041-3054.

- [109] TONG L H, XUE W, DING H. Influence of water content on clay deformation characteristics subjected to periodic intermittent loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 171: 107996.

- [110] GUAN L X, TONG L H, XU C J, et al. Forthcoming. Experimental and theoretical study on the cumulative settlement of subgrade under train loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023(8): 107996.



第一作者:徐长节(1972—),男,教授,博士,博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者,长江学者特聘教授,研究方向为土动力学、路基工程及基坑工程。E-mail:xucj@zju.edu.cn。



通信作者:童立红(1988—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为土动力学与路基工程。E-mail:lhtong@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)