

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20191017004

不同试验条件下高铁路基基床累积变形 差异探究*

商拥辉^{1,2}, 陈钊锋²

(1. 黄淮学院建筑工程学院, 河南 驻马店 463000; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 探索循环列车荷载作用下基床的累积变形规律, 是高速铁路建设养修的重要课题之一。借助试验分析累积变形仍是目前最可靠途径, 但受不同类型试验条件客观差异影响, 累积变形测试数据存在差异。为此, 结合动三轴试验、室内模型试验和现场动力测试, 对三种途径获取基床累积变形规律及差异进行探讨。研究结果表明: 模型试验和激振试验获取累积变形较为吻合, 测试累积变形曲线均呈快速、缓慢和稳定3阶段特征; 借助动三轴试验结果构建累积变形经验公式分析结果与文献估算值接近, 两者稳定时曲线均大于模型试验和现场测试, 差值约为0.7 mm; 不同途径获取基床累积变形在铁路运营3年内均能达到稳定状态, 最大值控制在2.5 mm以内。

关键词: 高速铁路; 列车荷载; 路基基床; 累积变形

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0357-06

Study on Accumulative Deformation Difference of High Railway Subgrade Bed under Different Test Conditions

SHANG Yonghui^{1,2}, CHEN Zhao Feng²

(1. Huang Huai College School of Architecture and Engineering, Zhumadian 463000, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Exploring the accumulative deformation law of subgrade bed under cyclic train load is one of the important subjects in the construction and maintenance of high speed railway. It is still the most reliable way to analyze accumulative deformation by means of experiments. But there are differences in cumulative deformation test data under the influence of the objective conditions in different types of test. Based on the dynamic triaxial test, indoor model test and field test, the accumulative deformation law and the difference between the test data obtained by the three ways for the subgrade bed are discussed. The results show that: the cumulative deformation collected through the model test and the vibration test is in good agreement. The cumulative deformation curve shows three stages of rapid, slow and steady periods with the dynamic characteristics; the calculation results obtained through the cumulative deformation empirical formula based on the triaxial test are close to those in published literatures, and are greater than those of the model and vibration tests, the difference is about 0.7 mm; the

* 收稿日期: 2017-07-18; 修回日期: 2017-11-19

基金项目: 高铁联合基金重点项目(U1134207)、国家自然科学基金项目(51078358)资助

作者简介: 商拥辉(1985—), 男, 博士研究生。主要从事特殊土路基与隧道方面的教学和科研工作。

E-mail: mlpeter@163.com

cumulative deformation of the subgrade bed gained by different ways all reaches a steady state within 3 years and the maximum value is less than 2.5 mm.

Keywords: high speed railway; train load; subgrade bed; acumulative deformation

引言

高速铁路列车荷载作用下基床累积变形是工后沉降重要组成部分^[1],实现其有效控制是建造高铁技术难点之一。德国规定铁路交通荷载引起附加沉降小于5 mm^[2],日本规定小于2.5 mm^[3],我国以不大于3.5 mm为控制条件^[4]。基床累积变形与路基结构形式、填料类型、动车组频率等密切相关,对其认识研究常见方法包括:理论分析、试验研究和数值模拟,其中试验研究仍是目前最有效可靠的方法。

结合常规动三轴试验,H. B. Seed等^[5]总结出黏土累积塑性变形随动应力变化规律;R. D. Barksdale^[6]认为塑性应变率随加载次数增加而降低;M. Hyodo等^[7]提出累积塑性应变率与动应力和围压比值有关;D. Q. Li等^[8]得出塑性应变与加载次数呈双对数关系。梅慧浩等^[9]利用大型动三轴探讨了不同应力幅值、围压、含水率对粗粒土土样累积变形的影响,将累积变形分为稳定、临界、破坏三种。现有累积变形经验公式通常适用于特定类型路基土,有一定局限性。

借助激振试验,合宁线普铁测试总结:动力影响深度约2.3 m,路基沉降约46~57 mm(激振200万次),基床部分占50%~65%^[10];京沪高铁桩板式低路堤测试总结:动力影响范围约2.0 m,循环加载120万次累积沉降趋于稳定,振动200万次基床表层沉降约0.39 mm^[11];云桂高铁膨胀土路基测试总结:动力影响范围约3.0 m,激振200万次基床表层累积沉降约为2.8 mm^[12]。随着技术进步,相比激振试验加载系统更贴合实际工况多作用器加载系统应用于室内模型试验。例如:边学成等^[13]建立1:1单线无砟轨道路基足尺模型,测试总结:动力影响深度约3.0 m,车速360 km/h激振25万次时累积沉降约1.6 mm。

综上所述,受振动荷载、路基结构形式及填料因素影响,不同研究方法获取累积变形均存在一定的局限性,即便同类激振试验获取基床累积变形亦存在差异。开展多种方法对比研究更有利于深层

次揭示累积变形特性。基于此考虑,结合路基填料动三轴试验、激振试验和模型试验,对比各种途径获取的累积变形特征及差异。研究成果可为高铁建设养修提供重要参考数据。

1 动三轴试验累积变形经验公式

1.1 试验方法

结合DDS-70型动三轴仪获取基床范围内水泥掺量5%改良膨胀土累积应变曲线。试样为直径为39.1 mm,高80 mm的圆柱体,在最优含水率(15%)条件下重型击实成样,压实度为95%,养护28 d。考虑到路基实际受力状态,围压为20、30和60 kPa即可涵盖基床深度范围。正弦波加载,频率为5 Hz,固结比为1,具体试验内容见表1。

表1 试验内容
Table 1 Test content

| 围压/kPa | 动应力幅值/kPa | | | | | | | | | |
|--------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 20 | 100 | 120 | 130 | 150 | 170 | 190 | 220 | 230 | 250 | |
| 30 | 120 | 140 | 160 | 180 | 190 | 220 | 240 | 260 | 280 | |
| 60 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 230 | 250 | 280 | 300 | |

1.2 试验结果及分析

图1为围压在20 kPa时的 $\epsilon_p \sim N$ 曲线,因试验动应力分级较粗,并未体现出处于临界态的累积应变曲线,只呈现稳定型和破坏型曲线。列车运行产生动应力远小于路基填料临界动应力,正常情况下,路基填料累积变形只有稳定型一种,故结合稳定型曲线拟合累积变形经验公式。

累积应变模型不仅能考虑加载次数,还要考虑影响循环累积应变的主要因素。G. Gidel等^[14]在大量室内动三轴试验及前人研究成果基础上,提出路基土循环荷载作用永久应变计算模型:

$$\epsilon_1^p = \epsilon_0^p (1 - N^{-B}) f(p_{ref}, q_{ref}) g(p_{ref}, q_{ref}) \quad (1)$$

式中, ϵ_1^p 为循环荷载作用下循环累积应变; ϵ_0^p 为与土性有关拟合参数; N 为加载次数; p_{ref} 和 q_{ref} 分别为循环荷载作用下附加体应力和附偏应力;函数 $f(p_{ref}, q_{ref})$ 为加荷应力路径长度;函数 $g(p_{ref}, q_{ref})$ 为当前应

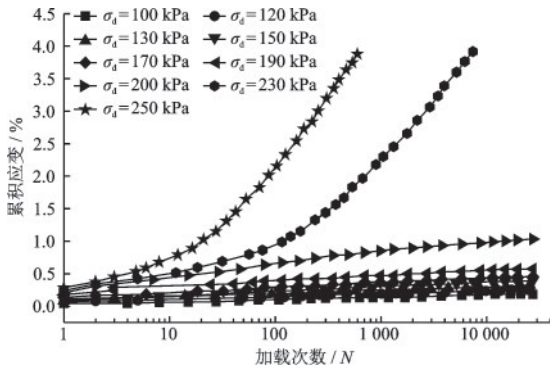


图1 $\epsilon_p \sim N$ 曲线
Fig.1 $\epsilon_p \sim N$ curve

力状态相对破坏线位置关系。考虑到实际应用,简化式(1)得到:

$$\epsilon_p = A(1 - N^{-m}) \quad (2)$$

式中, ϵ_p 为循环荷载作用下累积应变; A 为最终累积应变值; m 为试验参数。该式拟合效果较好,但由于两个参数 A 和 m 均为试验参数,且 m 物理意义不明确,土应力状态对 A 值影响难以体现。孔祥辉等^[15]考虑到结合路基填料实际应力条件,改进了式(2),得到:

$$\epsilon_p = a \left(\frac{q_d}{q_t} \right)^b \left(1 + \frac{q_s}{q_t} \right)^{-c} \left(\frac{p_c}{p_a} \right)^{-c} (1 - N^{-m}) \quad (3)$$

式中, q_d 和 q_s 分别为动、静偏应力; p_c 为围压; q_t 为静破坏偏应力; a, b 包含了土体的物理性质和动应力状态对最大累积应变影响;参数 c 为围压对最大累积应变影响;参数 m 为累积应变与加载次数关系,由累积应变归一化处理后与 N 关系拟合得到。此方法目前应用较多,以此方法对本试验填料累积变形进行拟合,得到模型参数: $a=0.51, b=0.524, c=0.233, m=0.254$,代入式(3)计算,用未参与拟合试验数据 ($p_c=20$ kPa, $\sigma_s=120$ kPa; $p_c=60$ kPa, $\sigma_s=140$ kPa) 进行验证。

由循环累积应变试验值和采用模型的计算值与加载次数的关系(图2)可以看出,模型计算结果和试验结果接近,该模型可用来计算水泥改良膨胀土在循环加载下的轴向累积形变。

列车荷载作用下路基累积变形主要表现在基床表层和基床底层部分。根据分层总和法,将路基基床表层和基床底层分层(每层取0.2 m),由式(3)计算每层最终循环累积应变值,可得到列车荷载作用下路基循环累积变形为:

$$S_p = \sum_{i=1}^N \epsilon_{pi} h_i \quad (4)$$

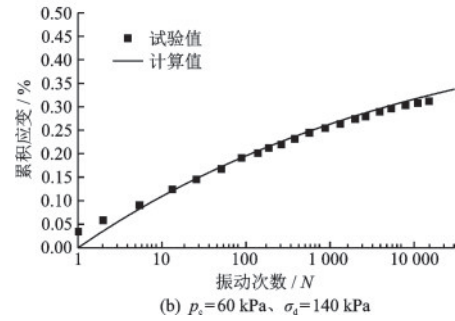
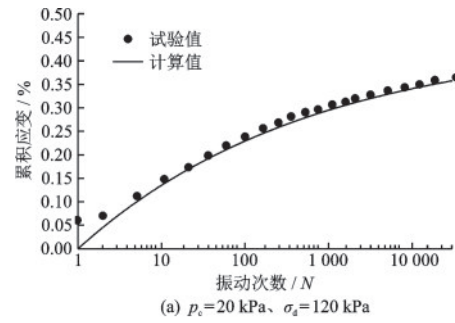


图2 累积应变的试验值和计算值

Fig.2 Test values and calculated values for cumulative strain

式中, ϵ_{pi} 为第 i 层累积应变; h_i 为第 i 层厚度。

2 激振试验测试累积变形

2.1 试验测试方法

激振试验中,累积变形通过在混凝土配重块设置沉降观测点定期测试获取。为开展路基动力响应相关研究,同时埋设了动土压力盒、加速度计等测试元件,具体测试方案如图3所示。

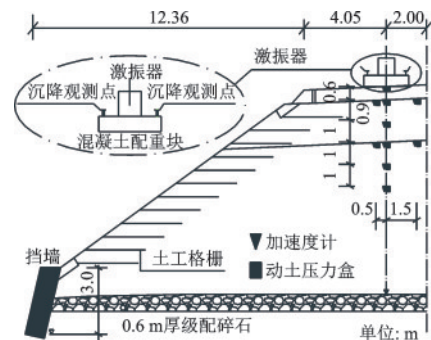


图3 断面元件布置

Fig.3 Layout of the cross-section components

2.2 测试结果及分析

图4为激振试验测试路基面累积变形随振动次数变化曲线。

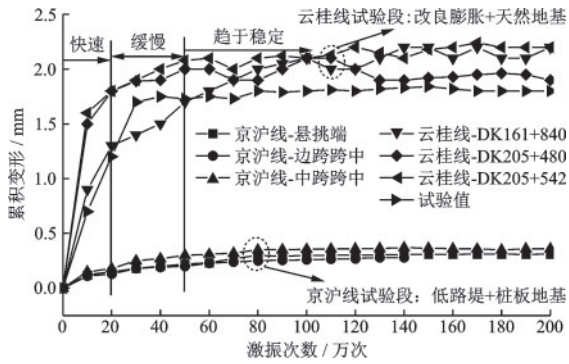


图4 路基面累积变形

Fig.4 Accumulative deformation of the road surface

由图4可知:路基面累积变形随振动次数发展呈快速、缓慢和稳定三阶段特征;振动0~20万次为快速增长阶段,速率为0.6 mm/10万次;振动20~50万次为缓慢增长阶段,速率为0.17 mm/10万次;振动次数超过50万次以后,累积变形趋于稳定,振动200万次时累积变形值约为1.72 mm;试验结果与云桂线改良膨胀土路基测试吻合度较高,与京沪线桩板式低路堤路基差值略大,约为1.5 mm。说明填料、结构形式对激振试验存在影响。同时,激振器型号与测试数据采集方法产生的误差不可忽略。

3 模型试验测试累积变形

3.1 试验测试方法

结合室内1:1单线无砟轨道路基模型,借助位移计及IMC数据采集系统测试累积变形。测试元件布置如图5所示。

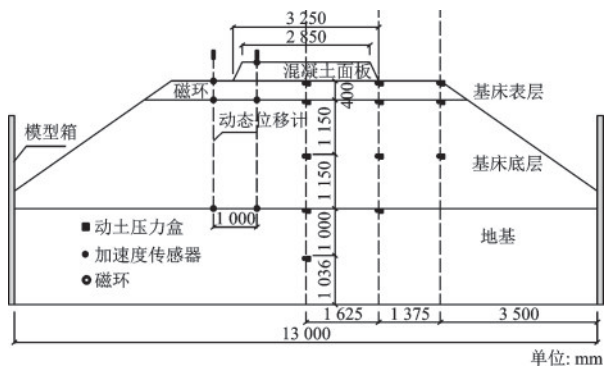


图5 测试元件布置

Fig.5 Test element layout

加载系统由5组大跨度刚性反力梁、10套伺服作动器、5组可独立工作的油源及控制器、1个冷凝

塔和1套MTS多通道协调控制系统组成。每个作动器通过动力荷载分配体系向相邻的两对扣件点传递列车振动荷载,故输入作动器的荷载时程应为其连接的扣件点反力时程的叠加。两对扣件点叠加曲线表达式为:

$$Q(t) = 2 [F(t - L_i/2c) + F(t + L_i/2c)] \quad (0 \leq t \leq T) \quad (5)$$

则作动器加载函数表达式为:

$$Q'(t) = \begin{cases} Q(t) & Q(t) \geq 0 \\ 0 & Q(t) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $F(t)$ 为扣件点反力,表达式为:

$$F(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + b_2 \cos(2\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + a_3 \cos(3\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) \quad (7)$$

式中, L_i 为扣件点间距; c 为列车速度; T 为列车荷载作用周期。作动器加载时,还应考虑真实列车经过时的周期效应。以车厢长度为25 m的CRH3/CRH380型动车组为例,速度为32 km/h、周期为0.257 s时,相邻两个作动器输入时程曲线如图7所示^[12],此曲线考虑了相邻车厢相邻转向架不同轮对列车振动荷载之间的叠加效应。

3.2 测试结果及分析

图6为模型试验测试基床表层表面累积变形随振动次数变化曲线。

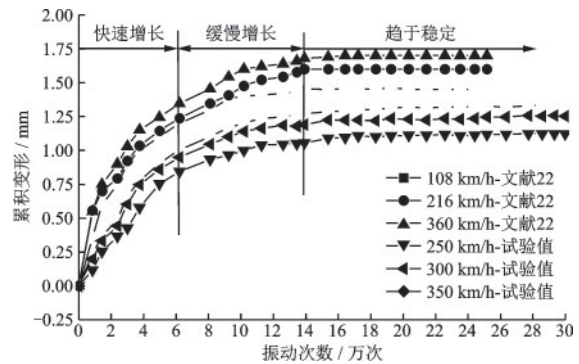


图6 路基面累积变形

Fig.6 Accumulative deformation of the road surface

由图6可知,基床表层表面累积变形在振动次数为0~6万时增长较快,速率约0.15 mm/万次;在振动为6~14万次时累积变形增长速率缓慢,约0.03 mm/万次;振动超过14万次后累积变形基本呈直线发展;速度为250、300和350 km/h对应振动30万次稳定时累积变形依次为1.13、1.25和1.34 mm。试验结果与文献[13]基本吻合,基床面累积变形在

振动14万次后均呈稳定状态;测试最大值误差约0.4 mm,初步分析可能是路基模型填料与加载系统差别所致。

4 不同方法获取累积变形特点

考虑列车动载作用下基床累积变形发生机理的复杂性,及各种方法获取累积变形局限性,需对比分析各种方法累积变形规律及差异。其中,模型试验中累积变形在30万次达到稳定后终止试验。

由图7可知,模型试验和激振试验获取累积变形规律吻合度高,模型试验获取累积变形进入稳定发展更早模型试验中累积变形在30万次达到稳定后终止试验;经验公式和文献[16]中估算结果较为吻合;不同途径获取累积变形在振动300万次内均达到稳定,稳定时最大值控制在2.5 mm以内,与日本规范^[2]接近,相比中国规范^[3]最大限值差约1 mm。

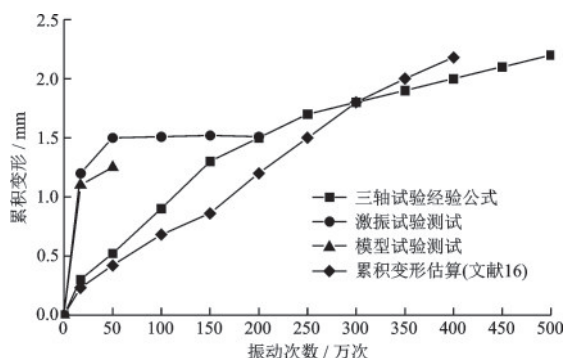


图7 累积变形对比

Fig.7 Accumulative deformation contrast

5 结论

(1)激振试验表明,路基面累积变形趋于稳定时的振动次数约为50万次,振动100万次和200万次累积变形分别约为1.70 mm和1.75 mm。

(2)模型试验表明,速度对累积变形存在影响。速度为250、300和350 km/h振动30万次对应累积变形依次为1.13、1.25和1.34 mm,速度每提高50 km,累积变形增长约0.1 mm。

(3)模型试验和激振试验结果接近,累积变形曲线均呈快速、缓慢和稳定三阶段特征;经验公式

与估算基本接近,大于模型试验和激振试验结果;不同途径获取累积变形在铁路运营3年内均达到稳定,最大值控制在2.5 mm以内,与日本规范接近,相比中国规范最大限值差约1 mm。

(4)相比而言,模型试验和激振试验方法获取累积变形规律更为可靠,核心在于提高测试精度;在缺乏直接获取累积变形条件下,经验公式与文献估算方法可作有益分析。考虑该问题复杂性,条件允许情况下,尽可能结合多种途径对比研究。

参考文献:

- [1] 刘钢,罗强,张良,等.基于累积变形演化状态控制的高速铁路基床结构设计计算方法[J].中国科学:技术科学,2014,44(7):744-754.
Liu G, Luo Q, Zhang L, et al. Computational methods of high-speed railway subgrade structure design based on cumulative deformation evolution state control [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7):744-754. (in Chinese)
- [2] Kim, Seong-Min. Vibration and stability of axial loaded beams on elastic foundation under moving harmonic loads [J]. Engineering Structures, 2004, 26 (1) : 94-105.
- [3] Takemiya H. Substructure simulation of inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(7):699-711.
- [4] 高速铁路设计规范:TB 10621—2014[S].北京:中国铁道出版社,2014.
High speed rail design specification: TB 10621—2014 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014. (in Chinese)
- [5] Seed H B, Chan C K, Monismith C L. Effect of repeated load on the strength and deformation of compacted clay[J].Highway Research Record,1955,34:541-558.
- [6] Barksdale R D. Laboratory evaluation of rutting in base course materials[C]//Proceedings of the Third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, London: International Society for Asphalt Pavements, 1972:161-167.
- [7] Hyodo M, Yasuhara K, Hirao K. Prediction of clay behavior in undrained and partially drained cyclic triaxial tests[J].Soils and Foundations,1992,32(4):117-127.
- [8] Li D Q, Selig E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(12):1006-1013.

- [9] 梅慧浩,冷伍明,刘文劫,等.持续动荷载作用下基床粗粒土填料累积塑性应变试验研究[J].铁道学报,2017,39(2):119-126.
Mei H H, Leng W M, Liu W J, et al. Experimental study on accumulative plastic strain of coarse grained soil filling material under continuous dynamic load[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 119-126. (in Chinese)
- [10] 朱忠林,马伟斌,史存林.合宁线试验段路堑基床地基地动力特性试验研究[J].铁道建筑,2007,47(2):55-58.
Zhu Zh L, Ma W B, Shi C L. Experimental study on dynamic characteristics of cutting foundation bed in quanning test section[J]. Railway Engineering, 2007, 47(2):55-58. (in Chinese)
- [11] 郑键斌,苏谦.高速铁路桩板式低路堤动力响应特性研究[D].成都:西南交通大学,2014.
Zheng J B, Su Q. Study on dynamic response of pile - slab embankment on high speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [12] 杨果林,王亮亮,房以河.云桂高速铁路不同防水层基床动力特性现场试验[J].岩石力学与工程学报,2014,33(8):1672-1678.
Yang G L, Wang L L, Fang Y H. In-situ test on dynamic characteristics of cutting subgrade with different waterproof layers along Yun-gui High-speed Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(8): 1672-1678. (in Chinese).
- [13] 边学成,蒋红光,陈云敏.等.基于模型试验的高铁路基动力累积变形研究[J].土木工程学报,2011,44(6):112-119.
Bian X Ch, Jiang H G, Chen Y 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. (in Chinese)
- [14] Gidel G, Hornych P, Chauvin J J, et al. A new approach for investigating the permanent deformation behavior of unbound granular material using the repeated load triaxial apparatus[J]. Bulletin des Laboratoires des Points et Chaussées, 2001, 233:5-21.
- [15] 孔祥辉,蒋关鲁.循环荷载下红层泥岩土累积变形特性[J].长江科学院院报,2012,29(12):68-72,77.
Kong X H, Jiang G L. Initial geostress field the surrounding rock of underground cavern under complex geological condition[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(12): 68-72, 77. (in Chinese)
- [16] 王敏,李义杰,徐林荣.高速铁路基动载沉降现场监测分析[J].土木建筑与环境工程,2017,39(6):22-29.
Wang M, Li Y J, Xu L R. Dynamic monitoring and analysis of aynamic settlement of high-speed railway subgrade[J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2017, 39(6):22-29. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)