

循环荷载作用下铁路路基级配碎石填料累积变形研究

李扬波¹, 张家生^{1,2}, 朱志辉^{1,2*}, 王 晷^{1,2}, 喻昭晟¹

(1.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2.中南大学 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075)

摘 要:路基在列车往复荷载作用下会产生累积变形,引起轨道不平顺,影响列车运行的舒适性和安全性。为揭示铁路路基级配碎石填料在循环荷载作用下的累积变形规律,对级配碎石开展了大型动三轴试验,研究了循环荷载作用次数、围压及循环应力比对级配碎石累积变形的影响。试验结果表明:1)随着循环应力比的增加,级配碎石试样累积变形达到稳定所需的循环次数逐渐增加;当循环应力比一定时,围压对级配碎石试样累积变形达到稳定所需的循环次数影响不明显,围压越大,级配碎石试样最终的累积变形越大。2)相同围压条件下,循环应力比越大,级配碎石试样累积变形达到稳定所需的循环次数越多,级配碎石试样最终的累积变形越大。3)围压越大,级配碎石试样最终累积变形越大。循环应力比越大,级配碎石试样最终累积变形越大;当循环应力比达到0.4时,已不符合稳定型累积变形规律。通过试验获得了循环荷载作用次数、围压及循环应力比对级配碎石累积变形规律的影响。基于试验结果,提出了铁路路基级配碎石填料稳定型累积变形预测模型,揭示了级配碎石稳定型累积变形规律,可为准确预测和控制铁路路基工后沉降提供依据。

关键词:级配碎石;大型动三轴试验;循环荷载;累积变形

中图分类号:TU43

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)05-0130-08

Accumulated Deformation of Gravel Filler of Subgrade under Cyclic Loading

LI Yangbo¹, ZHANG Jiasheng^{1,2}, ZHU Zhihui^{1,2*}, WANG Xuan^{1,2}, YU Zhaosheng¹

(1.School of Civil Eng., Central South Univ., Changsha 410075, China;

2.National Eng. Lab. for Consuiction Techol. of High Speed Railway, Central South Univ., Changsha 410075, China)

Abstract: Under cyclic loading of the train, the cumulative deformation of the subgrade will be produced, which causes the track irregularity and affects the comfort and safety of the train. In this paper, the cumulative deformation of grading macadam filter for railway subgrade under cyclic loading is studied by large dynamic triaxial tests. The tests were carried out to study the effects of cyclic loading time, confining pressure and cyclic stress ratio on accumulated deformation of grading macadam material. Based on the experimental results, a mathematical model that can reflect the development pattern of the cumulative deformation of grading macadam material is proposed. The tests show: 1) With the increase of cyclic stress ratio, the number of cycles required for the cumulative deformation achieves stability increases gradually. When the cyclic stress ratio is constant, the influence of confining pressure on the number of cycles required for stability is not obvious. The larger the confining pressure is, the larger the final cumulative deformation is. 2) Under the same confining pressure, the larger the cyclic stress ratio is, the more number of cycles are needed for stability and the larger the final cumulative deformation of the grading macadam material is. 3) The larger the confining pressure is, the larger the cumulative deformation is. The larger the cycle stress ratio is, the larger the final cumulative deformation is. When the cyclic stress ratio reaches 0.4, the accumulative deformation law is no longer valid for the stable type. The influence of cyclic loading time, confining pressure and cyclic stress ratio on the cumulative deformation of grading macadam material was obtained through experiments. According to the characteristic of stable type's cumulative deformation curve, a mathematical formula for predicting the cumulative

收稿日期:2017-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678576; 51378511; 51378514); 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201204); 湖南省高校创新平台开放基金资助项目(13K006)

作者简介:李扬波(1986—),男,博士生.研究方向:路基动力学. E-mail: Liyangbo1986@cus.edu.cn

*通信联系人 E-mail: zzh0703@163.com

网络出版时间:2018-08-29 23:58:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180829.2357.011.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

deformation of grading macadam material is proposed. The rule of stable type's cumulative deformation of grading macadam filter is revealed. It provides a basis for accurate prediction and control of post-construction settlement of railway subgrade.

Key words: graded gravel; large-scale dynamic triaxial test; cyclic loading; cumulative deformation

级配碎石具有强度高以及良好的渗透和变形特性,是高速铁路及重载铁路路基主要填筑材料^[1-2]。文献^[3-4]分别从变形特性、结构类型等方面对级配碎石的工程特性进行了研究。随着中国铁路建设的飞速发展,关于级配碎石填料工程特性的研究已经不能满足需求,尤其是荷载条件等因素对级配碎石累积变形的影响尚未见报道,有必要对其开展进一步的研究。

路基在列车往复荷载作用下会产生累积变形,从而导致轨道平顺性变差,影响列车运行的舒适性和安全性。为避免路基产生危及铁路正常运行的变形,国内外学者针对路基填料的长期累积沉降变形规律开展了研究。Wichtmann等^[5]通过不排水循环三轴试验研究了在小应变幅值和高循环周次条件下砂土的累积变形规律。NgocSon等^[6]研究了低幅值高频率循环荷载下粗粒土的累计变形特性。Bian等^[7]通过循环三轴试验,研究了道砟、底砟以及道砟和底砟交界面的轴向应变和体积应变等特性。蒋关鲁等^[8]通过静、动三轴试验验证了红层泥岩填料能够满足高速铁路路基填料的要求,并分析了红层泥岩土作为路基填料在低围压条件下的累积沉降变化规律。

经验拟合法是目前研究交通荷载作用下各类土长期累积变形的最主要方法。Monismith等^[9]提出的指数模型是目前最常用的预测模型。后来,为解决该模型参数取值范围大等缺陷,有学者在动三轴试验的基础上对指数模型进行了改进^[10-11]。臧濛等^[12]在融合指数函数和指数双曲线函数的基础上,提出了可描述循环荷载作用下黏土累积变形特性的改进模型。刘萌成等^[13]考虑路基土动力响应特性,基于因子分析方法建立了路基土累积变形预测模型。目前有不少学者研究土体累积变形经验拟合模型^[9-13],但关于高速铁路路基填料累积变形的预测模型尚需深入研究。翟婉明等^[14]指出目前尚未建立起符合实际的列车长期重复荷载作用下路基材料累积沉降模型,而其对高速铁路路基动力稳定性设计与评价具有重要意义。刘宝等^[3]将试验中级配碎石累积变形分为稳定型、临界型和破坏型。在列车循环荷载作用下,由于应力较低,路基填料累积变形很快趋于稳定,即属于稳定型累积变形。文献^[15]指出,即便高速铁路路基产生在规范允许范围内的沉降变形,也会引起轨道不平顺,导致轮轨力显著增大。综上所述,建立铁路路基级配碎石填料稳定型累积变形预测模

型具有重要意义。

为研究级配碎石填料在列车循环荷载作用下的累积变形规律,及建立级配碎石稳定型累积变形预测模型,作者通过大型动三轴试验系统对级配碎石填料开展了固结不排水试验,研究了循环荷载作用次数、围压和循环应力比对级配碎石累积变形规律的影响。并提出了一个能合理反映级配碎石稳定型累积变形发展规律的数学模型,以揭示铁路路基级配碎石填料在列车循环荷载作用下的长期服役性能,为准确预测和控制铁路路基工后沉降提供依据。

1 试验方案

1.1 试验设备

试验采用TAJ-2000大型动静三轴试验仪,如图1所示,该仪器由主机、油压源系统以及电控系统组成,能实现应变控制、应力控制以及应变速率控制3种控制方式。该仪器具有采集动应力、动应变、动孔隙水压力和体变等数据的功能。试样直径为300 mm,高为600 mm,图2为加载系统简图。



图1 TAJ-2000大型动静三轴试验仪

Fig. 1 TAJ-2000 large-scale triaxial equipment

1.2 试验材料

级配碎石为石灰岩,呈青灰色,未风化,质地坚硬,棱角鲜明,不含有机物等杂质,如图3所示。通过筛分试验确定级配碎石试样的级配曲线如图4所示,由图4可知级配碎石试样满足《铁路路基设计规范》^[16]中铁路路基填筑要求。

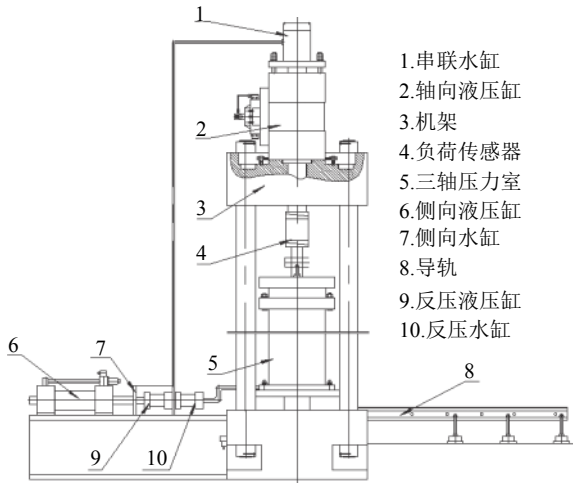


图 2 TAJ-2000大型动静三轴试验加载系统

Fig. 2 Components of TAJ-2000 large-scale triaxial load apparatus

本文试验材料最大粒径超过20 mm, 采用DJ30-5重型电动击实仪开展击实试验, 得到试样的干密度与含水率的关系如图5所示, 测定其最优含水率为4.32%, 最大干密度为 2.25 g/cm^3 。

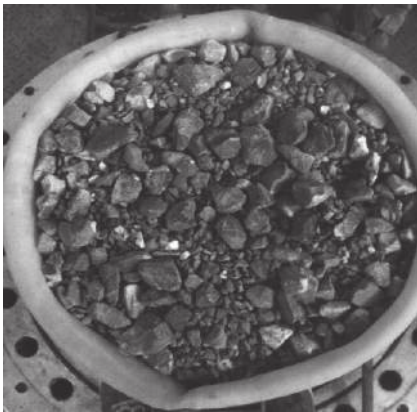


图 3 试验土样

Fig. 3 Tested material

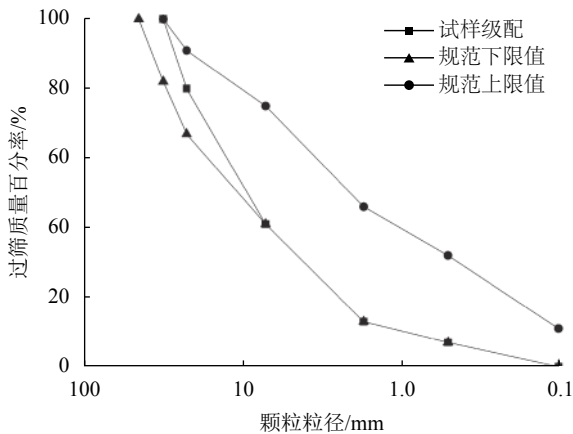


图 4 填料级配曲线

Fig. 4 Gradation curve of tested material

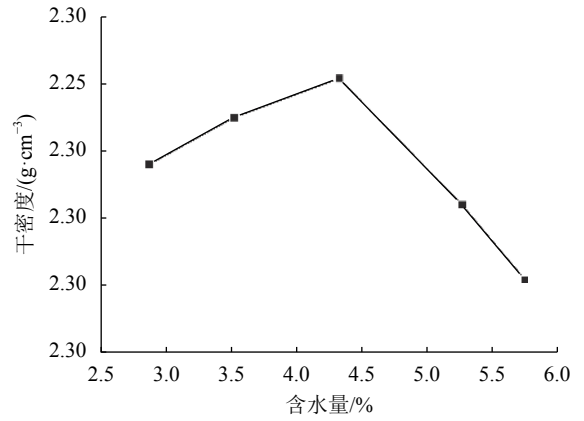


图 5 级配碎石干密度与含水率关系曲线

Fig. 5 Relationship between moisture content and dry density

循环应力比可定义为动应力幅值与土体静强度之比, 其表达式为:

$$CSR = \frac{\sigma_d}{q_f} \quad (1)$$

式中, CSR 为循环应力比, q_f 为土体的静强度, σ_d 为动应力幅值。

为获得土体静强度, 采用图1所示的TAJ-2000大型动静三轴试验仪对试样进行固结不排水试验。得到试验土样的静强度如表1所示。

表 1 静强度试验结果

Tab. 1 Static strength of soil

围压/kPa	100	200	300
静强度/kPa	450.7	847.7	1 121.1

1.3 试验方案

铁路路基厚度一般为5 m, 填料重度以 20 kN/m^3 计算, 则为对应的围压为100 kPa。因此本试验的围压选用100、200、300 kPa。铁路路基中动荷载一般为 $35 \sim 185 \text{ kPa}$ ^[17], 考虑到重载铁路轴重的发展趋势, 本文适当扩大了动荷载范围, 循环应力比(动应力幅值与土体静强度之比)分别为0.2、0.3、0.4, 为考虑围压较低时循环应力比对累积变形的影响, 其中100 kPa条件下增加循环应力比为0.1时的试验工况。试验中荷载控制频率为3 Hz, 固结比为1。

为保证试样压实度满足高速铁路路基基床填料压实标准, 试样分5层进行击实, 控制压实度为0.97^[1]。采用真空抽气法对试样进行饱和, 先对试样抽真空大于2 h; 再让土样由下而上饱和, 待试样上部出水20 min后停止抽气, 改用水头饱和法对试样进行饱和, 当孔隙压力系数大于95%时认为试样饱和完成。试验时采用双向排水等压固结, 若试样30 min内排水量小于15 mL则认为试样完成固结, 然后将排水阀关闭。固结完成后, 对试样施加动荷载。

本次试验共10个试样,根据所施加的围压,共分成3组。采用应力控制的加载方式,在试样轴向施加半正弦波循环荷载,循环加载次数为30 000次。轴向荷载加载方式如图6所示。

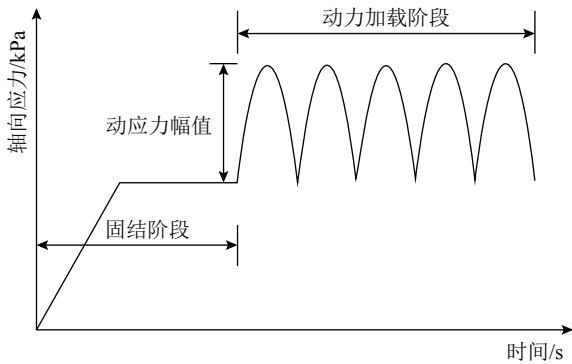


图6 试验加载过程
Fig. 6 Test procedure

2 试验结果分析

2.1 轴向变形发展规律

级配碎石试样在循环荷载作用下产生的轴向变形分为弹性变形 ε_e 和累积塑性变形 ε_p 两部分,如图7(a)所示。其中弹性变形是指在卸荷过程中轴向变形可以恢复的部分;而累积变形指卸载过程中轴向变形不能恢复的塑性变形部分,这部分变形会随着循环荷载作用次数的增加而逐渐累积。

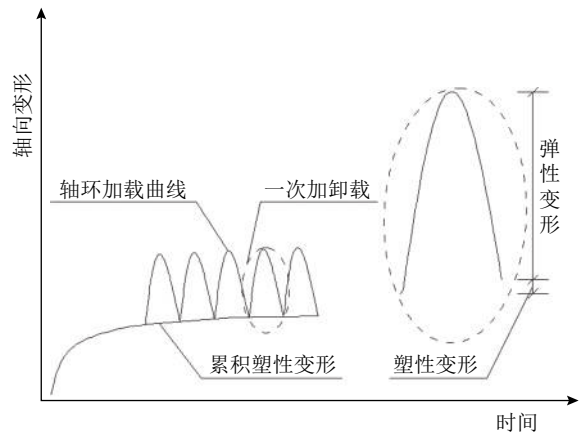
$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (2)$$

图7(b)所示为围压等于200 kPa、循环应力比等于0.2时试样轴向变形随循环荷载作用次数关系曲线。在循环荷载作用前期,轴向变形会随着荷载作用次数的增加而增大,当循环荷载轴次达到15 000次时,轴向变形趋于稳定。其中轴向变形的变化主要由累积变形引起,轴向变形趋于稳定时,回弹变形占轴向变形的比例小于5%,且在整个试验过程中弹性变形随荷载作用次数的变化不明显。

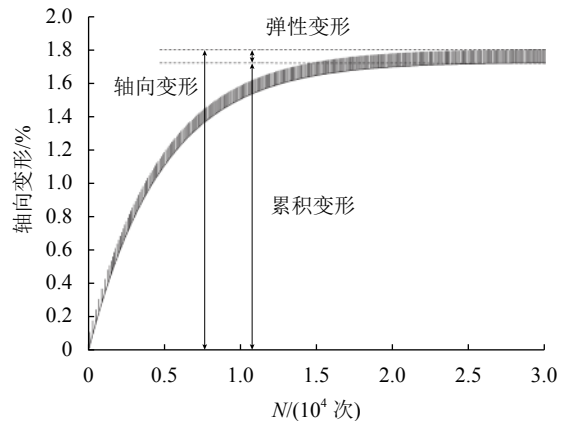
2.2 累积变形发展规律

2.2.1 围压对累积变形的影响

根据设计的动三轴试验方案,获得了试样在不同围压及不同循环应力比下的累积变形规律。图8给出了不同循环应力比下围压对级配碎石累积变形的影响。为形象描述试样在循环荷载作用下累积变形发展规律,以累积变形增长速率作为累积变形不同阶段的区分点,即每一百次循环加载产生累积变形占试验最终累积变形的1%、0.1%作为累积变形快速增长、缓慢增长和稳定的分界点。图8给出了循环应力比分别为0.2、0.3、0.4时不同围压下级配碎石试样累积变形规律。



(a) 示意图



(b) 试验值

图7 轴向变形发展曲线

Fig. 7 Axial strain versus loading cycles

1)由图8(a)可知试样在前7 500次循环荷载作用下,累积变形快速增长;当超过7 500次循环荷载作用后,累积变形增长速率逐渐减小,变为缓慢增长;而当超过15 000次循环荷载作用后,试样的累积变形逐渐趋于稳定。

2)由图8(b)可知试样在前9 500次循环荷载作用下,累积变形快速增长;而当超过9 500次循环荷载作用后,累积变形增长速率逐渐减小,变为缓慢增长;而当超过18 000次循环荷载作用后,试样的累积变形逐渐趋于稳定。

3)由图8(c)可知试样在前12 000次循环荷载作用下,累积变形较快增长;而当超过12 000次循环荷载作用后,累积变形增长速率逐渐减小,但累积变形在循环荷载作用达到30 000次时还在明显增加。

由图8可知,随着循环应力比的增加,级配碎石试样累积变形达到稳定所需的循环次数逐渐增加。当循环应力比一定时,围压对级配碎石试样累积变形达到稳定所需的循环次数影响不明显,围压越大,级配碎石试样最终的累积变形越大。由表1可知试样静强度随着围压的增大而增大,当循环应力比一定

时,则围压越大试样的动应力也越大。因此该现象说明围压越大,试样所对应的临界动应力也越大,即试样具有更好的稳定性。

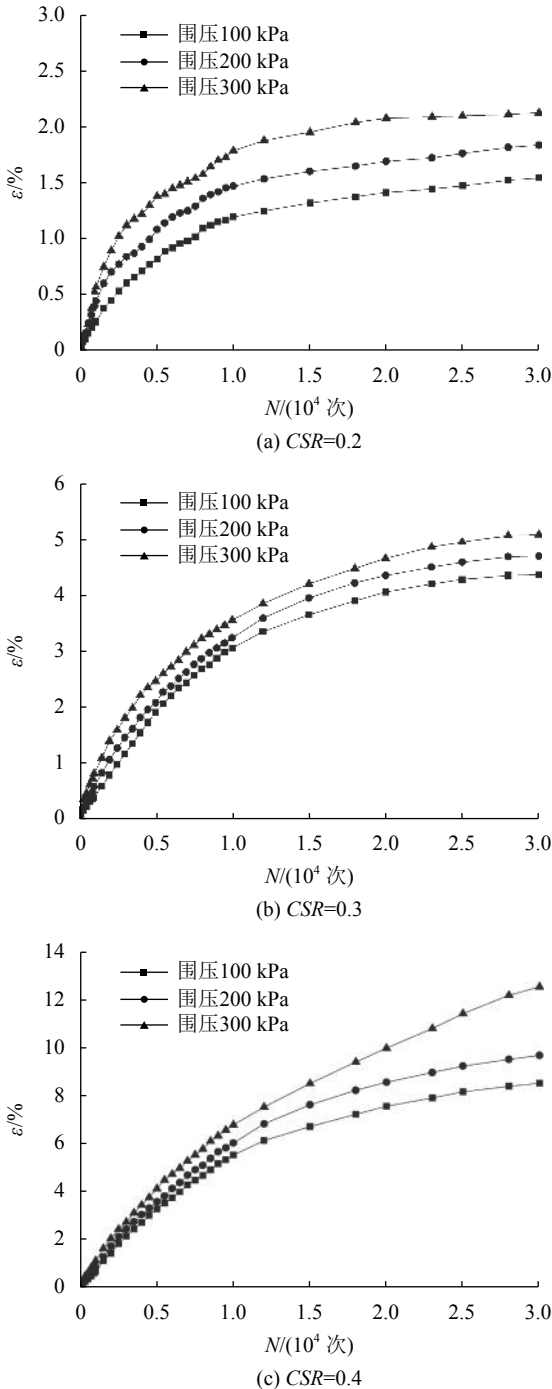


图 8 不同围压下累积变形随 N 变化曲线

Fig. 8 Cumulative deformation versus N

2.2.2 循环应力比对累积变形的影响

以围压100 kPa为例(图9),分析循环应力比对级配碎石试样轴向累计变形规律的影响。由图9可知,级配碎石试样累计变形随着循环荷载作用次数的增加而增加,但增长速率呈现出衰减趋势,且试样的累积变形主要是在加载初期产生。可将试样的累积变

形发展曲线分为3个阶段:

1)在加载初期,试样的累积变形随循环荷载作用次数的增加而快速增加,累积变形增长速率衰减较慢,呈近似线性关系;

2)随着循环荷载作用次数的增加,累计变形的增长逐渐趋缓,累积变形增长速率衰减较快;

3)当循环应力比较小($CSR=0.1、0.2、0.3$)时,循环荷载作用到一定次数后,试样的累计变形增加缓慢并到达稳定值;当循环应力比较大($CSR=0.4$)时,循环荷载作用达到30 000次时,累计变形仍未趋于稳定。当循环应力比较小时,试样在一定加载次数内压密变形就会完成,之后在循环荷载作用下只产生弹性变形,不再产生塑性变形,即试样的累积变形最终能达到稳定状态;而当循环应力比达到0.4时,即试样承受的动应力超过了试样的临界动应力^[3],试样颗粒之间产生翻越、滑移等行为,试样土体之间的摩擦力与咬合力也会随之降低,导致试样累积变形随着加载次数的增长而增长,在加载结束时还未达到稳定状态。

由图9可知,相同围压条件下,循环应力比越大,级配碎石试样累积变形达到稳定所需的循环次数越多,级配碎石试样最终的累积变形越大。说明循环应力比对级配碎石试样的稳定性起着重要作用。

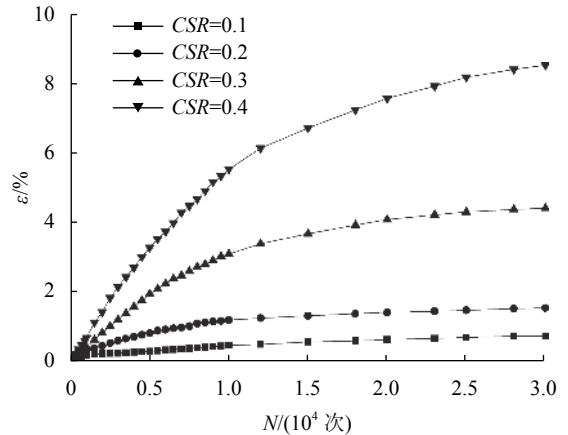


图 9 不同循环应力比下累积变形随 N 变化曲线

Fig. 9 Cumulative deformation versus N

2.3 累积变形 $\varepsilon_{30\,000}$ 分析

罗强等^[18]指出无砟轨道路基在列车荷载作用下应快速达到稳定值,该稳定值应满足与轨道结构类型相适应的路基累积变形控制要求。表2中列举了不同围压及不同循环应力比条件下试样的 $\varepsilon_{30\,000}$ 累积变形。

1)在循环应力比等于0.2时,围压为200 kPa时试样累积变形 $\varepsilon_{30\,000}$ 较围压为100 kPa时增加了19.4%,围压为300 kPa时试样累积变形 $\varepsilon_{30\,000}$ 较围压为200 kPa时

增加了15.2%;在循环应力比等于0.3时,围压为200 kPa时试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 较围压为100 kPa时增加了7%,围压为300 kPa时试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 较围压为200 kPa时增加了9.1%;在循环应力比等于0.4时,围压为200 kPa时,试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 较围压为100 kPa时增加了13.7%,围压为300 kPa时试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 较围压为200 kPa时增加了29.5%。在循环应力比等于0.2和0.3时,试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 与围压近似成线性关系,且随着围压的增加,试样 $\epsilon_{30\,000}$ 增加较小;当循环应力比等于0.4时,达到30 000次循环荷载时试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 与围压不成线性关系,且随着围压的增大,试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 的幅较大。

表2 试样 $\epsilon_{30\,000}$ 累积变形

Tab. 2 Cumulative deformation of $\epsilon_{30\,000}$

围压/kPa	CSR			
	0.1	0.2	0.3	0.4
100	0.73	1.54	4.42	8.53
200	—	1.84	4.73	9.70
300	—	2.12	5.16	12.56

2)以围压100 kPa为例,随着循环应力比的增加,试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 分别增加了111%、187%、93%。试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 随着循环应力比的增加而增加,但增长率呈现先增大后减小的趋势。

3)围压对试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 的影响较小,而循环应力比对试样累积变形 $\epsilon_{30\,000}$ 的影响较大。且当循环应力比达到0.4时,试样在循环荷载作用下累积变形不能快速达到稳定,已不能满足路基累积变形控制要求。

3 累积变形预测模型

3.1 预测模型的提出

为满足线路平顺性、结构稳定性和扣件调整能力的要求,《高速铁路设计规范》^[1]中规定无砟轨道路基工后沉降不超过15 mm,其中包含了路基和地基两部分的沉降。因此,无砟轨道路基在列车循环荷载作用下应满足设计要求,即在有限的荷载作用次数内产生较小累积变形,且达到稳定。

土体在循环荷载作用下会产生累积塑性变形,在试验基础上提出的预测模型是预测土体累积变形的研究方法。其中应用最广的为Monismith^[9]提出的指数模型:

$$\epsilon = aN^m \quad (3)$$

式中, ϵ 为累积变形, N 为循环荷载次数, a 、 m 为拟合参数。

很多学者对指数模型进行了改进^[10-11],但模型中累积变形 ϵ 对循环荷载次数 N 的一阶倒数恒大于零,即累积变形会随着循环次数无限增加的本质并没有改变,累积变形会随着循环次数的增加而一直增加。这些预测模型中累积变形发展趋势与铁路路基在一定循环周次作用后变形趋于稳定的特征相违背。基于在有限的荷载作用次数下,路基土即达到稳定工作状态的事实,采用衰减函数描述级配碎石累积变形更为合理。因此,作者提出了级配碎石“稳定型”累积变形与循环荷载次数的数学模型。

$$\epsilon = \alpha(1 - e^{-\beta N}) \quad (4)$$

式中, N 为循环荷载次数; α 、 β 为试验参数, α 能反映累积变形极限值。

刘宝等^[3]用Stewart模型描述级配碎石稳定型累积变形:

$$\epsilon = \alpha + \beta \ln N \quad (5)$$

式中, α 、 β 为试验参数。

为验证本模型更适用于分析基床表层级配碎石填料稳定型累积变形规律,分别用Stewart模型和本文模型对围压100 kPa、循环应力比0.2条件下试验数据进行拟合。在此基础上,再用拟合得到模拟参数对50 000次循环荷载后试样的累积变形进行预测,结果如图10所示。在超过25 000次循环荷载作用次数后,试验值累积变形已达到稳定状态,其累积变形不再随循环荷载作用次数的增加而增加,该试验现象与铁路路基在一定循环周次作用后变形趋于稳定的特征一致;文献^[3]方法预测值随着循环荷载作用次数的增加继续增长,与填料的实际变形特征不一致;而文中预测模型累积变形发展趋势与级配碎石试样在一定循环周次作用后变形趋于稳定的特征相吻合。因此,本模型更适用于预测级配碎石稳定型累积变形。

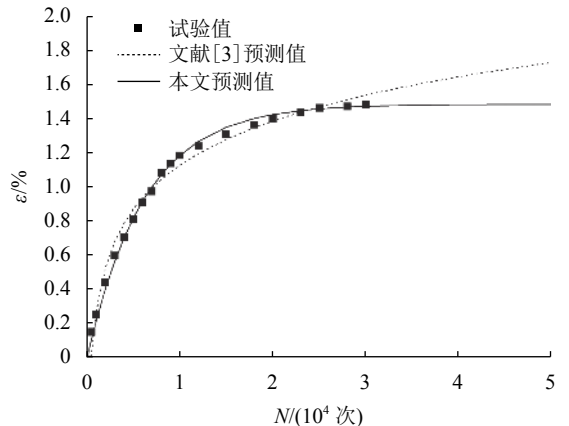


图10 试验值与预测值对比

Fig. 10 Predictive value versus practical testing value

3.2 拟合参数分析

作者从围压和循环应力比对式(4)中的参数进行拟合。

由表3可知,在围压一定时,拟合参数 α 随着循环应力比增大而增大,参数 β 随着循环应力比的增大而减小。参数 α 能够反映试样的最终累积变形, α 值随着循环应力比的增大而增大,恰好能够反映在围压一定时,试样的累积变形会随着循环应力比的增加而增加。在循环应力比一定时,参数 α 和 β 随着围压的增大而增大。

表 3 级配碎石累积变形拟合参数值

Tab. 3 Fitting parameters of cumulative deformation on graded gravel

围压/kPa	循环应力比	α	$\beta/10^{-4}$	相关系数
100	0.2	1.488 4	1.65	0.995 6
	0.3	4.618 2	1.09	0.999 1
	0.4	9.135 8	0.90	0.999 5
200	0.2	1.726 6	2.06	0.987 8
	0.3	4.863 8	1.16	0.998 7
	0.4	10.514 8	0.85	0.999 7
300	0.2	2.029 4	2.30	0.985 2
	0.3	5.060 4	1.34	0.993 3
	0.4	13.976 2	0.68	0.997 2

4 结 论

为揭示铁路路基级配碎石填料在列车循环荷载作用下的长期服役性能,对级配碎石填料累积变形特性开展试验研究和理论分析。主要得到以下结论:

1) 级配碎石填料轴向变形随循环次数的增加而增大。其中级配碎石填料轴向变化的变化主要由累积变形导致,轴向变形趋于稳定时,回弹变形占轴向变形的比例较低。

2) 相同围压下,循环应力比越大,级配碎石试样累积变形达到稳定所需的循环次数越大。当循环应力比一定时,围压对级配碎石试样累积变形达到稳定所需的循环次数影响不明显。

3) 围压越大,级配碎石试样最终累积变形越大。循环应力比越大,级配碎石试样最终累积变形越大;当循环应力比达到0.4时,试样已不符合稳定型累积变形规律。为了保证铁路的长期稳定性,应限制铁路路基的循环应力比。

4) 根据级配碎石稳定型累积变形曲线特征,提出了一个能合理预测级配碎石稳定型累积变形变化规律数学关系式,并验证了其合理性。

参考文献:

- [1] 国家铁路局.高速铁路设计规范:TB 10621—2014[S].北京:中国铁道出版社,2014.
- [2] 国家铁路局.重载铁路设计规范:TB 10625—2017[S].北京:中国铁道出版社,2017.
- [3] Liu Bao,Su Qian,Pham Duc Phong,et al.Study of critical dynamic stress and deformation law of graded gravel under different moisture content[J].*Journal of the China Railway Society*,2016,38(6):100–107.[刘宝,苏谦,Pham Duc Phong,等.不同含水状态级配碎石临界动应力及变形规律研究[J].*铁道学报*,2016,38(6):100–107.]
- [4] Xiong Zhiwen,Jin Lan,Cheng Jia,et al.Experimental study on improved coarse grain frost heaving characteristics of filling for high speed railway[J].*China Railway Science*,2015,36(5):1–6.[熊治文,金兰,程佳,等.高速铁路改良粗颗粒填料冻胀特性试验研究[J].*中国铁道科学*,2015,36(5):1–6.]
- [5] Wichtmann T,Triantafyllidis T.Stress attractors predicted by a high-cycle accumulation model confirmed by undrained cyclic triaxial tests[J].*Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,2015,69(2):125–137.
- [6] Nguyen N,François S,Degrade G.Discrete modeling of strain accumulation in granular soils under low amplitude cyclic loading[J].*Computers and Geotechnics*,2014,62(s298):232–243.
- [7] Bian Xuecheng,Jiang Jianqun,Jin Wangfeng,et al.Cyclic and postcyclic triaxial testing of ballast and subballast[J].*Journal of Materials in Civil Engineering*,2016,28(7):1–11.
- [8] Jiang Guanlu,Fang Lifeng,Wang Zhimeng,et al.Experimental study on dynamic strength and accumulated deformation characteristics of red-mudstone filling[J].*Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2010,32(1):124–129.[蒋关鲁,房立凤,王智猛,等.红层泥岩路基填料动强度和累积变形特性试验研究[J].*岩土工程学报*,2010,32(1):124–129.]
- [9] Monismith C L,Ogawa N,Freeme C R.Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J].*Transport Research Record*,1975,537:1–17.
- [10] Li D,Selig E T.Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J].*Journal of Geotechnical and*

Geoenvironmental Engineering,1996,122(12):1006–1013.

- [11] Trinh V N,Tang A M,Cui Y,et al.Mechanical characterisation of the fouled ballast in ancient railway track substructure by large-scale triaxial tests[J].*Soils and Foundations*,2012,52(3):511–523.
- [12] Zang Meng,Kong Lingwei,Cao Yong.Improved model for cumulative deformations of clay subjected to cyclic loading[J].*Rock and Soil Mechanics*,2017,38(2):1–8.[臧濛,孔令伟,曹勇.描述循环荷载作用下黏土累积变形的改进模型[J].*岩土力学*,2017,38(2):1–8.]
- [13] Liu Mengcheng,Xie Bo,Gao Yufeng,et al.Modeling of cumulative residual deformation of subgrade soils under long-term cyclic loading[J].*China Civil Engineering Journal*,2013,46(10):135–142.[刘萌成,谢波,高玉峰,等.长期循环荷载作用下路基土累积残余变形模拟[J].*土木工程学报*,2013,46(10):135–142.]
- [14] Zhai Wanming,Jin Xuesong,Zhao Yongxiang.Some typical mechanics problems in high-speed railway engineering[J].*Advances in Mechanics*,2010,40(4):358–374.[翟婉明,金学松,赵永翔.高速铁路工程中若干典型力学问题[J].*力学进展*,2010,40(4):358–374.]
- [15] Jiang Hongguang.Dynamic interaction of slab track structure-subgrade system and accumulative settlement in high-speed railways[D].Zhejiang:Zhejiang University,2014.[蒋红光.高速铁路板式轨道结构—路基动力相互作用及累积沉降研究[D].浙江:浙江大学,2014.]
- [16] 中华人民共和国铁道部.铁路路基设计规范:TB 1001—2016[S].北京:中国铁道出版社,2016.
- [17] Li Zichuan.Study on the vertical load transmission through the track structure and the characteristics of subgrade dynamic stresses[D].Beijing:China Academy of Railway Sciences,2010.[李子春.轨道结构垂向荷载传递与路基附加动应力特性的研究[D].北京:铁道科学研究院,2010.]
- [18] Luo Qiang,Liu Gang,Zhang Liang,et al.Characteristics of cumulative deformation evolution state of subgrade filler under cyclic loading and experimental verification[J].*Journal of the China Railway Society*,2016,38(7):110–116.[罗强,刘钢,张良等.循环荷载作用下基床填料累积变形演化状态特征及试验验证[J].*铁道学报*,2016,38(7):110–116.]

(编辑 张琼)

引用格式: Li Yangbo,Zhang Jiasheng,Zhu Zhihui,et al.Study of accumulated deformation of gravel filler of subgrade under cyclic loading[J].*Advanced Engineering Sciences*,2018,50(5):130–137.[李扬波,张家生,朱志辉,等.循环荷载作用下铁路路基配碎石填料累积变形研究[J].*工程科学与技术*,2018,50(5):130–137.]