文章编号:1001-4888(2020)04-0629-10

循环载荷作用下级配碎石力学特性试验研究*

张文力，冯梅梅，吴疆宇

（中国矿业大学 力学与土木工程学院，深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，江苏 徐州 221008）

摘要：级配碎石广泛应用于铁路和公路路基，本文以提高路基服役性能、完善路基结构优化设计为研究目的，通过循环载荷作用试验，分析了不同频率以及不同幅值下级配碎石变形、破碎规律，建立了频率、幅值与级配碎石累积变形、回弹模量等力学参数间的关系。结果表明，载荷频率是影响级配碎石变形特性的主要因素；低频作用下，级配碎石破碎度随着载荷频率的增加而降低，这主要与载荷作用时间有关，而随着载荷幅值的增加，级配碎石破碎度呈增长的趋势。此外，不论在载荷频率还是幅值影响下，级配碎石回弹模量与累积变形间总呈正相关关系，然而，当以载荷频率为试验影响因素时，级配碎石累积变形、回弹模量均随破碎度的增加而减小，与载荷幅值为影响因素下的变化规律恰恰相反，这主要与载荷作用形式以及颗粒破碎形式有关。

关键词：循环载荷；级配碎石；累积变形；回弹模量；破碎度

中图分类号：TU45 **文献标识码**：A DOI：10.7520/1001-4888-18-210

0 引言

随着我国铁路交通提速与快速发展，级配碎石磨耗、粉化导致的路基沉降变形问题日益突出，这就需要深入研究级配碎石的力学行为与劣化机理，为进一步提升路基服役性能提供理论依据。关于级配碎石在循环载荷作用下的变形规律及影响因素，国内外许多专家学者从不同角度展开了分析，取得了很多研究成果。如李杨波[1]等人研究了载荷作用次数、循环应力比以及围压对级配碎石累积变形的影响，构建了级配碎石稳定累积变形的预测模型，为预测路基施工后沉降提供了理论依据。Indrarata[2]等人进行了频率为 10～40Hz 的循环加载试验，揭示了不同频率下级配碎石变形以及破碎的变化规律。严颖[3]等人通过道砟箱数值模拟试验发现：循环载荷的加载次数以及加载频率对道砟材料累积沉降量影响较大。肖军华[4]等人针对粉土路基研究了不同列车速度、轴重、加载次数等参数下路基变形规律，发现当路基厚度达到 5m 以上时，沉降变形随路基高度变化逐渐减小。对于级配碎石破碎规律的研究，目前主要通过采用洛杉矶磨耗试验、离散元法、激光三维扫描等[5－10]方法进行分析。Nakata[11]等人通过单个颗粒破碎试验证明了颗粒存活概率与应力存在韦伯(Weibull)分布函数关系。童晨曦[12]等人通过分析单一粒径颗粒的破碎试验，研究了颗粒破碎概率、破碎状态以及破碎极限的变化规律，并提出了单一粒径组稳定级配的计算方法。为研究地震、爆破等动力作用下采空区石膏矿柱力学特性的变化，李晓彤[13]等人从能量角度分析了循环载荷作用下石膏损伤破坏规律。综合以上研究发现，目前研究方向主要在于不同因素下级配碎石力学特性的变化规律，但对于级配碎石力学参数(如累积变形、破碎度等)间如何相互影响的研究较少。

本文将通过模拟重载铁路下载荷作用规律，分析频率、幅值对级配碎石力学特性的影响，研究不同

* **收稿日期**：2018-09-17；**修回日期**：2019-11-02

基金项目：国家自然科学基金项目(51404266)

通讯作者：冯梅梅(1979－)，女，博士，副教授，主要从事岩石力学及工程方面的研究。Email：fengmeimei@cumt.edu.cn

因素下级配碎石累积变形以及回弹模量的变化规律，采用分布系数[14]描述级配碎石破碎特性，揭示不同频率以及不同幅值下级配碎石破碎规律，以累积变形、回弹模量以及破碎度为级配碎石力学参数，构建以上力学参数间的函数关系，为预测控制道路施工后沉降提供依据。

1 试样制备及方案

1.1 试样制备

对于普通铁路道床，一般采用硬度等级为 6～7 的石英石或石灰石作为碎石道砟材料，本文选用石英石[15]作为级配碎石研究对象进行循环加载试验。试验级配遵循《铁路碎石道砟》[16]规范要求进行设计，为提升不同因素下试样力学性能变化规律的对比效果，本文采用级配范围的下限作为试验级配进行试验。由于试验条件限制，通过参考张振东[17]、王远[18]等人的试验方法，采用了缩尺方法[19]对碎石颗粒进行配比，并将试验直径的 1/5 定为最大颗粒粒径(即 15mm)[5]，用于级配碎石力学特性的研究。配比所得粒径分布曲线如图 1 所示。

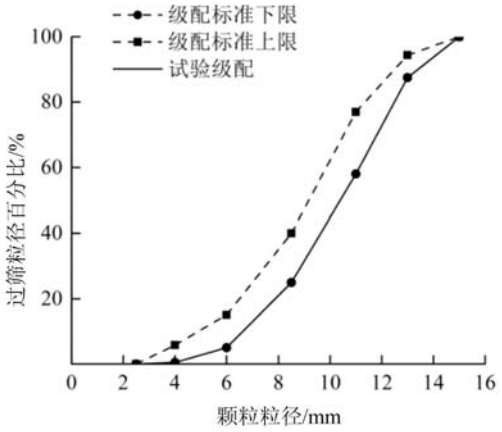
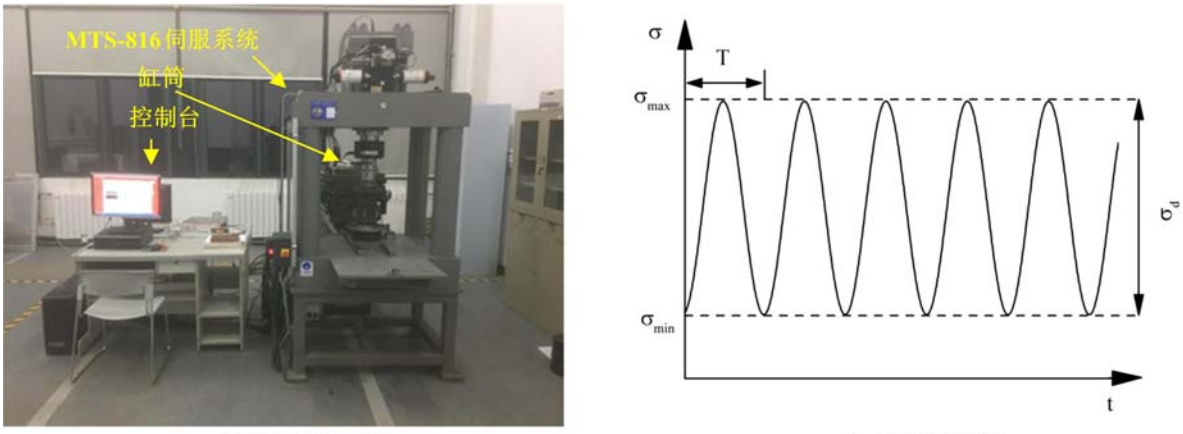


图 1 试验级配曲线图

Fig. 1 Test gradation curve

1.2 试验步骤及方案[5]

依据图 1 试验级配曲线，对各粒径区间碎石进行配比，级配碎石总质量为 1000g。试验采用内径 100mm、高 220mm 的缸筒作为试样容器，将级配碎石置于缸筒中，经振动压实后通过 MTS-816 伺服试验机进行循环载荷加载试验，图 2(a)为试验仪器示意图。经参考相关试验研究发现，级配碎石试样状态一般约在循环 6000 次后达到稳定[20-22]，因此本文循环次数设为 6000 次[5]。试验采用力控制进行加载，输出应力波形为正弦波，如图 2(b)所示，图中 σ_{max} 表示应力波最大值；σ_{min} 表示应力波最小值；σ_d 表示载荷幅值；T 表示周期[5]。据相关研究[23-26]，目前列车轨枕以及道砟受到的压强大小为 100～500kPa，因此应力波最小值设为 120kPa，应力波最大值即为载荷幅值与应力波最小值之和。试验频率一般为 0～5Hz，具体试验方案如表 1 所示。



(a) 试验仪器示意图 (b) 试验应力途径

图 2 试验仪器及应力波形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test equipment and stress wave

表 1　试验方案

Tab. 1　Experiment scheme

试样编号	级配编号	载荷幅值/kPa	载荷频率/Hz
1-0.25-500	1	500	0.25
1-0.25-200	1	200	0.25
1-0.25-300	1	300	0.25
1-0.25-800	1	800	0.25
1-0.1-500	1	500	0.1
1-0.15-500	1	500	0.15
1-0.4-500	1	500	0.4

2　试验结果分析

循环载荷作用过程中，试样会发生回弹变形，但仍存在部分变形不能完全恢复，则不能完全恢复变形部分称为残余变形，可恢复变形为弹性变形。为更直观描述级配碎石回弹特性，Seed[27]等人提出了回弹模量的概念，即偏应力与可恢复应变的比值，其表达式为

$$M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_r} \tag{1}$$

式中，M_r 为回弹模量；σ_1 和 σ_3 分别为最大最小主应力；ε_r 为弹性应变。

对于碎石颗粒粒径的分布状态，可采用分布系数 r 进行描述，其表达式如式(2)所示，即各粒径区间中颗粒总质量占总级配碎石质量的百分比与该粒径区间最大颗粒粒径乘积之和[5]。本文将采用分布系数 r 差值绝对值 $|\Delta r|$ 来描述颗粒破碎度。

$$r = \sum_{n=1}^{k} W_n D_n \tag{2}$$

$$|\Delta r| = |r - r'| \tag{3}$$

式中，k 为级配碎石中粒径区间的总个数；D_n 为第 n 组粒径区间的最大颗粒粒径；W_n 为第 n 组粒径区间的颗粒质量占总级配碎石质量的百分比；r 为加载前分布系数，r' 为加载后分布系数；其中，颗粒粒径均以 mm 为单位[5]。

为此，本文采用累积变形与回弹模量来描述级配碎石的变形特性，利用 $|\Delta r|$ 描述级配碎石的强度特性，以此分析载荷频率以及载荷幅值对级配碎石力学特性的影响。

2.1　频率对级配碎石力学特性的影响

2.1.1　频率对级配碎石变形特性的影响

图 3 为不同载荷作用频率的级配碎石累积变形、回弹模量随循环次数的变化曲线。由图可知：碎石的累积变形量以及回弹模量均随频率的增高而增大，随着加载频率的增加，累积变形在加载初始阶段的增长变化速率也逐级上升，表明在加载频率越高的情况下，级配碎石压密效果越明显。当加载次数达到约 1000 次后，试样累积变形增长速率逐渐趋于平稳；图 4 为在循环加载第 6000 次时级配碎石的累积变形以及回弹模量随频率的变化曲线。图中所列关系式即为级配碎石累积变形、回弹模量与频率间的拟合关系式，其中 ε_{6000} 表示循环加载 6000 次时的累积应变；f 为载荷频率；$M_{r,6000}$ 为循环加载 6000 次时的回弹模量；R^2 表示相关系数。由图易知，在 0.1～0.4Hz 之间，载荷频率与级配碎石的累积变形、回弹模量间存在指数关系，说明频率对试样变形影响是较为显著的，且频率对试样累积变形的影响比对回弹模量的要大。

2.1.2　频率对级配碎石破碎度的影响

表 2 为循环加载后，不同级配碎石下各粒径区间的颗粒质量变化数据表(表中数据单位为 g，变化量均以加载后某粒径区间颗粒质量减对应的加载前颗粒质量为计算公式进行计算)，图 5 为不同频率下

应力波形示意图。由表 2 得出了不同频率下级配碎石破碎度变化曲线,如图 6 所示。

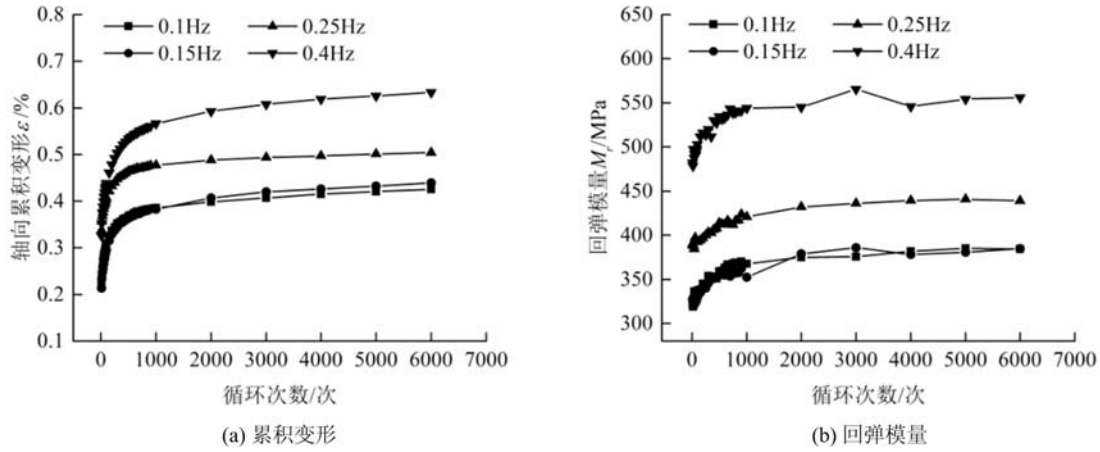


图 3 循环载荷作用下不同频率的级配碎石累积变形、回弹模量变化曲线

Fig. 3 The curves of accumulated deformation and modulus under different frequency

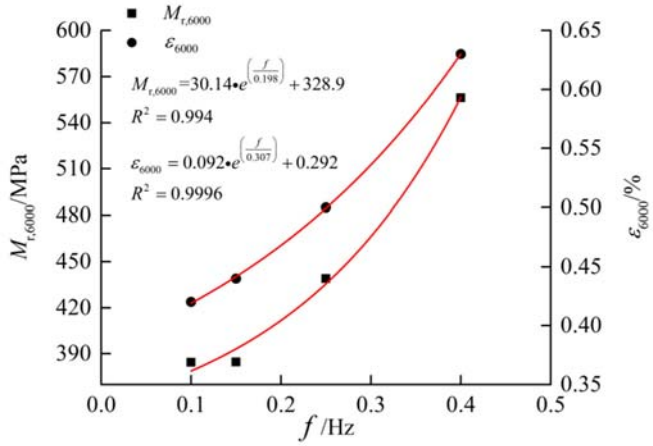


图 4 级配碎石变形参数随频率的变化曲线

Fig. 4 The curves of frequency and deformation characteristics of aggregate

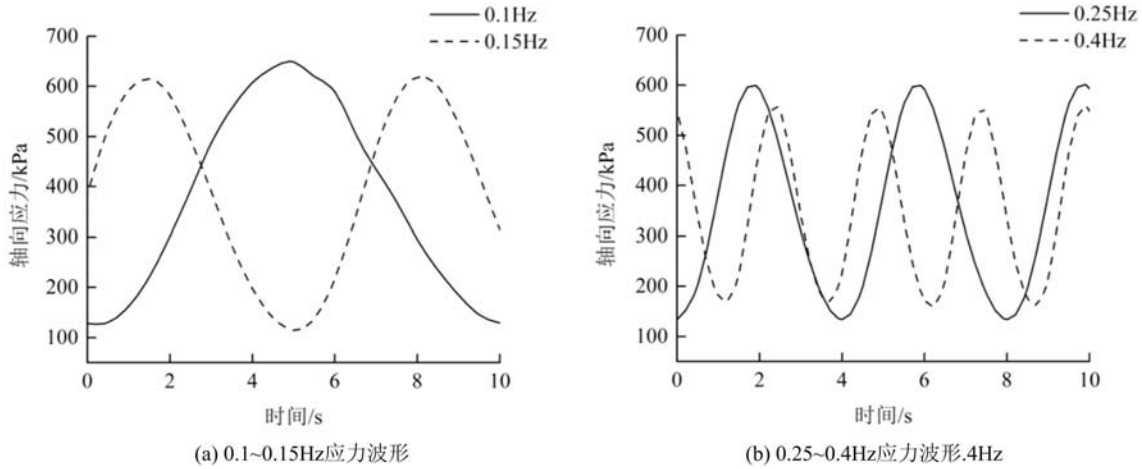


图 5 不同频率应力波形

Fig. 5 The load wave under different frequency

表 2　各试样加载前后颗粒质量变化量(单位:g)

Tab. 2　The change of particle quality of each sample after loading (unit: g)

粒径/mm 试样编号	0～2.5	2.5～4	4～6	6～8.5	8.5～11	11～13	13～15
1-0.25-200	0.92	2.29	2.93	−4.52	−2.75	9.88	−8.75
1-0.25-300	0.46	3.18	2.0	−4.5	−2.84	9.33	−7.59
1-0.25-500	0.42	1.6	4.02	−5.89	13.52	0.46	−13.2
1-0.25-800	1.91	6.2	5.11	−5.14	16.46	−15.9	−8.69
1-0.1-500	1.24	3.71	7.58	1.91	17.6	−26.3	−6.56
1-0.15-500	1.81	5.53	5.43	−7.12	13.88	−0.56	−19.8
1-0.4-500	0.31	2.25	3.87	−6.39	17.59	−16.3	−0.86

由图 6、表 2 可知：

(1) 在不同频率作用下，粒径大于 11mm 的碎石颗粒质量均出现不同程度的减少，表明该粒径颗粒发生了破碎，且破碎后 8.5～11mm 粒径颗粒质量增长较多，而这些增多的颗粒恰是由 11～15mm 粒径颗粒经循环加载发生破碎产生的，说明试验加载前后，粒径为 11～15mm 的颗粒粒径变化较小；

(2) 当载荷频率处于 0.1～0.4Hz 时，随着频率的增大，级配碎石破碎度呈减小趋势。由图 5 可知，频率越低，完成一个循环加载周期所需的时间越长。因此，频率越低，同样的循环次数下，级配碎石承压的时间也就越长，而长时间的受压状态将对碎石抗破碎能力产生一定影响，更易发生破碎，故载荷频率越低，级配碎石破碎度越大。

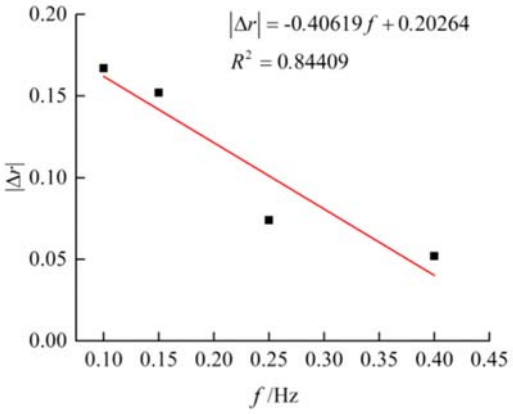


图 6　不同频率下 $|\Delta r|$ 变化曲线

Fig. 6　The fitting diagram between frequency and $|\Delta r|$

2.1.3　基于频率影响下级配碎石力学参数的构建

载荷频率与级配碎石力学参数间能否通过建立某种函数表达式，进而描述不同频率下级配碎石力学参数间对应关系，对此，作者进行了尝试，得到了基于频率影响下级配碎石力学参数间函数曲线，如图 7所示。图中每个点代表每个频率作用下所对应的力学参数值，曲线即为图中函数表达式对应曲线。由图可知：

(1) 在载荷频率影响下，当载荷循环作用 6000 次时，回弹模量 $M_{r,6000}$ 随着累积应变 ε_{6000} 增大而增大，且回弹模量 $M_{r,6000}$ 与累积应变 ε_{6000} 间存在指数关系；

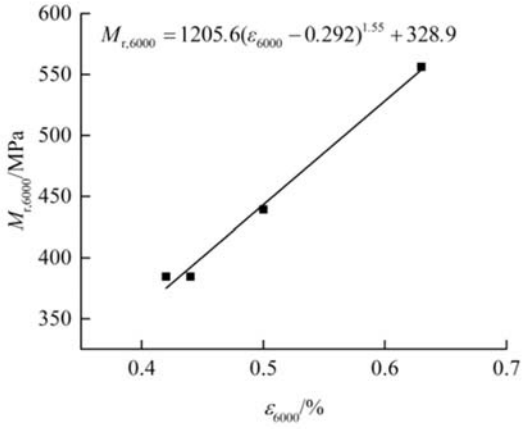
(2) 基于频率影响下，破碎度 $|\Delta r|$ 与累积应变 ε_{6000} 间也呈指数关系，但 ε_{6000} 随着 $|\Delta r|$ 增大而减小，这是由于破碎颗粒粒径前后并未发生明显变化，此时频率对于级配碎石累积变形的影响主要表现在其对级配碎石压实度的影响，频率越高，颗粒运动速度越快，颗粒间孔隙填充效果越好，因而累积变形越大。而在频率越高的情况下，碎石颗粒破碎度越小，因此累积应变 ε_{6000} 与颗粒破碎度 $|\Delta r|$ 间呈负相关的关系；

(3) 由于不同频率下，回弹模量 $M_{r,6000}$ 与累积应变 ε_{6000} 均随着频率增大而增大，因此回弹模量 $M_{r,6000}$ 随破碎度 $|\Delta r|$ 变化曲线与累积应变 ε_{6000} 随破碎度 $|\Delta r|$ 变化曲线一致，也呈负相关关系。

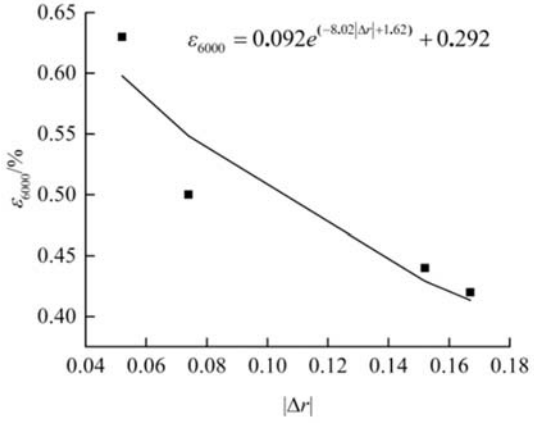
2.2　幅值对级配碎石力学特性的影响

2.2.1　幅值对级配碎石变形特性的影响

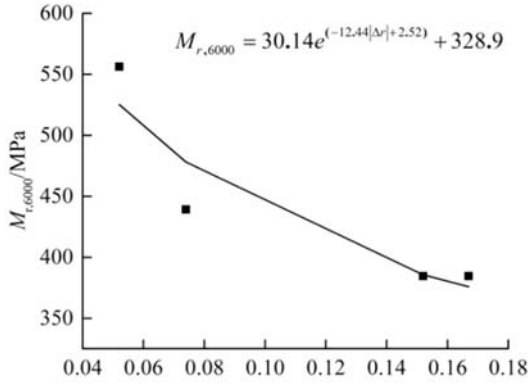
为描述级配碎石累积变形、回弹模量在不同幅值下的变化规律，给出了如图 8 所示的不同载荷幅值



(a) $M_{r,6000}$-ε_{6000}关系图



(b) ε_{6000}-|Δr|关系图



(c) $M_{r,6000}$-|Δr|关系图

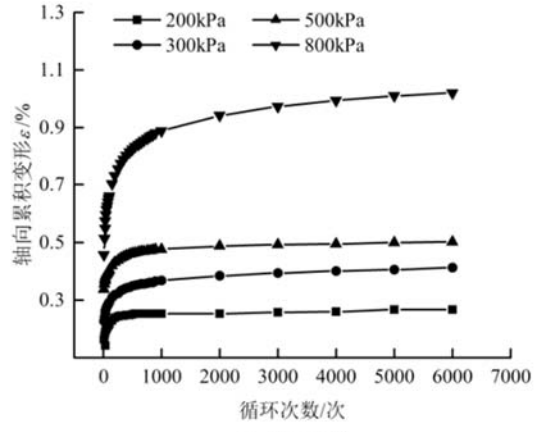
图 7 基于频率影响下级配碎石力学参数关系图

Fig. 7 The relation curve of mechanical parameters of gravel aggregate based on the influence of frequency

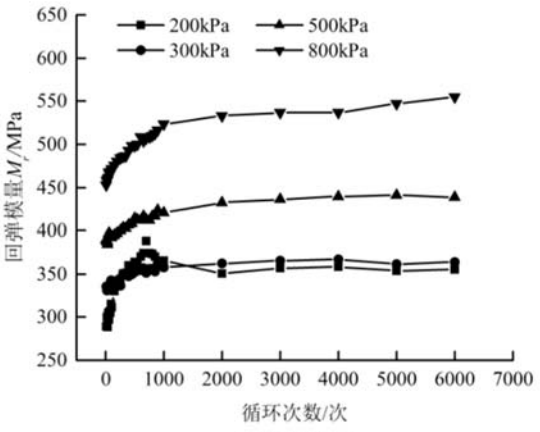
下级配碎石累积变形、回弹模量随循环次数的变化曲线。由图 8 可看出累积变形、回弹模量均随幅值增大而增大,其中幅值为 200kPa 时试样的回弹模量随着加载次数变化出现了不同程度的波动,主要由于加载过程中碎石颗粒间不断地错动重排导致整体级配碎石试样回弹变形不稳定,从而使得回弹模量曲线出现了不同幅度的波动。图 9 为级配碎石回弹模量和累积变形随幅值的变化曲线。由图可知,幅值与级配碎石变形参数间呈线性关系,且通过观察斜率可知,级配碎石回弹模量随载荷幅值的增长速率大于累积变形随载荷幅值的增长速率。

2.2.2 幅值对级配碎石破碎度的影响

依据表 2 得出幅值与级配碎石破碎度|Δr|间函数关系,如图 10 所示。幅值与级配碎石破碎度|Δr|之间呈线性关系,随着幅值增大,碎石颗粒需



(a) 累积变形



(b) 回弹模量

图 8 不同载荷幅值下级配碎石累积变形、回弹模量变化曲线

Fig. 8 The curves of accumulated strain and modulus under different load amplitude

承担的载荷也就越大,高强度的加载模式使得级配碎石颗粒更易发生破碎,因此幅值越大,级配碎石破碎越大。为更为直观地对比频率、幅值对级配碎石破碎度的影响程度,本文将图 6、图 10 中|Δr|变化曲线横坐标划分在同一数量级内,得出载荷频率影响下的破碎度拟合曲线斜率为 0.04062,而载荷幅值影

响下的破碎度拟合曲线斜率为 0.017286，因此，对级配碎石破碎度影响程度更大的是载荷频率。

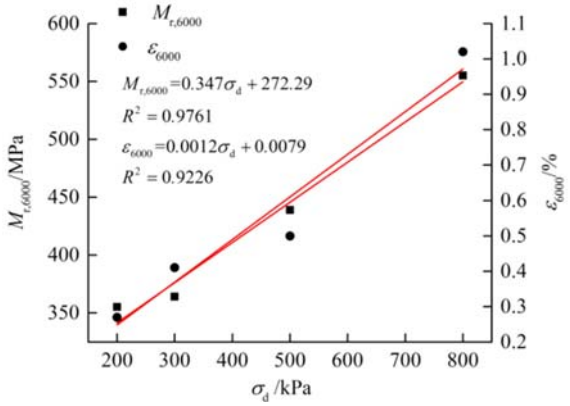


图 9　级配碎石变形参数随幅值的变化曲线

Fig. 9　The curves of amplitude and deformation characteristics of aggregate

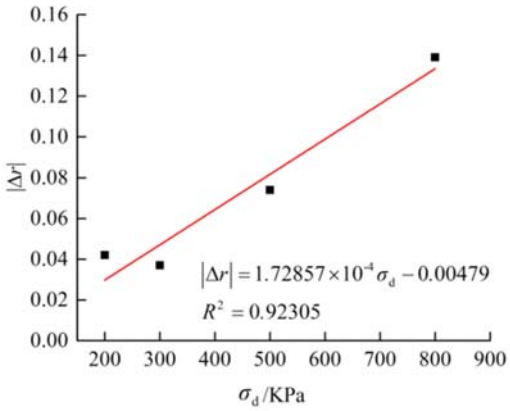
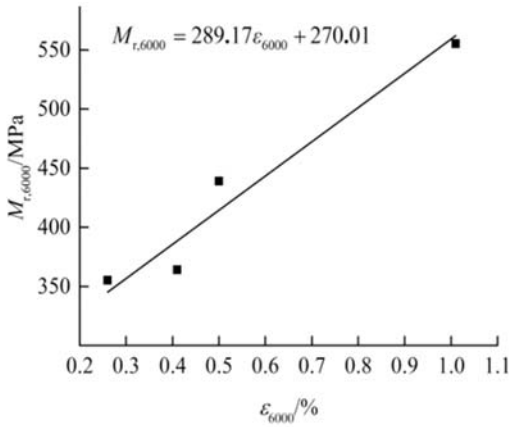
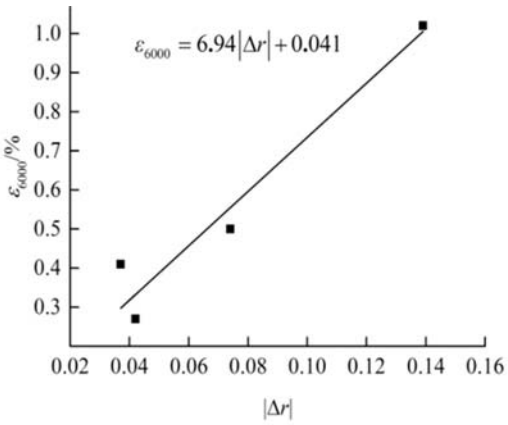


图 10　不同幅值下 $|\Delta r|$ 变化曲线

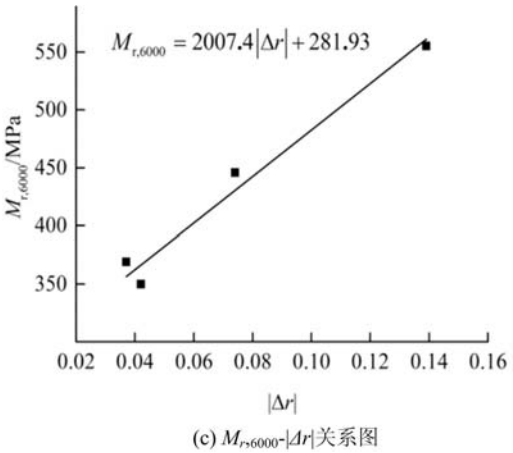
图 10　The fitting diagram between amplitude and $|\Delta r|$



(a) $M_{r,6000}$-ε_{6000}关系图



(b) ε_{6000}-$|\Delta r|$关系图



(c) $M_{r,6000}$-$|\Delta r|$关系图

图 11　基于幅值影响下级配碎石力学参数关系图

Fig. 11　The diagram of mechanical parameters of gravel aggregate based on the influence of amplitude

2.2.3　基于幅值影响下级配碎石力学参数的构建

图 11 为不同幅值下级配碎石累积变形、回弹模量、破碎度两两之间的对应关系，图中各点表示不同幅值作用下对应的力学参数值。由图可知，以载荷幅值为影响因素时，累积应变 ε_{6000} 越大，则该幅值下所对应的回弹模量 $M_{r,6000}$ 越大，同时级配碎石破碎度 $|\Delta r|$ 也就越大，两两之间总是呈正相关关系，且均可用线性关系进行描述。

3　结论

本文通过级配碎石循环载荷作用试验，探究了频率以及幅值对级配碎石力学特性的影响，研究了级配碎石破碎度在不同因素下的变化规律，分别对频率、幅值与级配碎石变形参数（累积变形、回弹模量）之间的关系进行了回归分析，了解了同种影响条件下级配碎石力学参数之间相互影响的作用机制，现得出主要结论如下：

（1）通过分析试验数据可得知：载荷频率与级配碎石变形参数间均呈指数关系，而载荷幅值与变形

参数间均呈线性关系，因此在加载频率较高的条件下，可通过降低载荷幅值来控制累积变形。相较于载荷幅值，载荷频率对级配碎石变形特性影响更大；

(2) 本文通过采用分布系数 r 差值绝对值来描述颗粒破碎度，并对不同因素下破碎度变化规律进行了回归分析，结果发现，当载荷频率处于 0.1～0.4Hz 时，频率越低，颗粒受压状态时间越长，越易发生破碎，因而破碎度越大。但在载荷频率不变的情况下，级配碎石破碎度仍随幅值的增大而增大；

(3) 不论在载荷频率还是幅值影响下，级配碎石回弹模量与累积变形间总呈正相关关系。在不同载荷频率作用下，级配碎石累积变形 ε_{6000} 以及回弹模量 $M_{r,6000}$ 随破碎度 $|\Delta r|$ 增大而减小，与不同载荷幅值作用下的变化规律相反，主要与载荷作用形式以及颗粒破碎形式有关。

参考文献：

[1] 李杨波，张家生，朱志辉，等. 循环荷载作用下铁路路基级配碎石填料累积变形研究[J]. 工程科学与技术，2018，50(5)：1－8 (LI Yangbo，ZHANG Jiasheng，ZHU Zhihui，et al. Study of accumulated deformation of gravel filler of subgrade under cyclic loading[J]. Advanced Engineering Science，2018，50(5)：1－8 (in Chinese))

[2] Indraratna B，Thakur P K，Vinod J S. Experimental and numerical study of railway ballast behavior under cyclic loading[J]. International Journal of Geomechanics，2010，10(4)：136－144.

[3] 严颖，赵金凤，季顺迎. 道砟材料累积沉降量和形变模量的离散元分析[J]. 铁道科学与工程学报，2016，13(6)：1031－1038 (YAN Ying，ZHAO Jingfeng，JI Shunying. Discrete element analysis of settlement and deformation modulus of railway ballasts[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2016，13(6)：1031－1038 (in Chinese))

[4] 肖军华，周顺华，韦凯. 列车振动荷载下铁路粉土路基的长期沉降[J]. 浙江大学学报(工学版)，2010，44(10)：1912－1918 (XIAO Junhua，ZHOU Shunhua，WEI Kai. Long term settlement of railroad silt subgrade induced by train loading[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science)，2010，44(10)：1912－1918 (in Chinese))

[5] 张文力. 循环载荷作用下碎石集料的力学特性及宏细观破裂机理研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2019 (ZHANG Wenli. Study on mechanical properties and macro-micro failure mechanisms of crushed stone aggregate under cyclic loading[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2019 (in Chinese))

[6] 井国庆，郭云龙，黄红梅，等. 基于洛杉矶磨耗试验和图像分析道砟劣化研究[J]. 铁道科学与工程学报，2016，13(8)：1486－1491 (JING Guoqing，GUO Yunlong，HUANG Hongmei，et al. Ballast degradation analysis by los angeles abrasion test and i mage analysis method[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2016，13(8)：1486－1491 (in Chinese))

[7] 张振超，赵春发，张徐. 加载位置对道砟静态压碎形式的影响研究[J]. 铁道建筑，2014(11)：152－156 (ZHANG Zhenchao，ZHAO Chunfa，ZHANG Xu. Simulation study on inf luence of load position on static crushing form of ballasts[J]. Railway Engineering，2014(11)：152－156 (in Chinese))

[8] Yu Qian，Huseyin B，Maziar M，et al. Degradation-related changes in ballast gradation and aggregate particle morphology[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2017，143(8)：04017032.

[9] Navaratnarajah S K，Indraratna B. Use of rubber mats to improve the deformation and degradation behavior of rail ballast under cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2017，143(6)：04017015.

[10] Bono J D，Mcdowell G. On the micro mechanics of one-dimensional normal compression[J]. Géotechnique，2013，63(11)：895－908.

[11] Nakata A F L，Hyde M，Hyodo H. A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test[J]. Géotechnique，1999，49(5)：567－583.

[12] 童晨曦，张升，李希，等. 单一粒径组颗粒材料破碎规律及破碎极限研究[J]. 岩土力学，2015，36(s1)：260－264 (TONG Chenxi，ZHANG Sheng，LI Xi，et al. Evolution and ultimate state of breakage for uniformly graded granular materials[J]. Rock and Soil Mechanics，2015，36(s1)：260－264 (in Chinese))

[13] 李晓彤，周跃进，王明宇. 循环载荷下滞回环与石膏损伤破坏性能的关系[J]. 实验力学，2018，33(2)：194－200 (LI Xiaotong，ZHOU Yuejin，WANG Mingyu. Research on the relationship between hysteresis loop and damage performance of gypsum under cyclic load[J]. Journal of Experimental Mechanics，2018，33(02)：194－200 (in

Chinese))

[14] 冯梅梅，吴疆宇，陈占清，等. 连续级配饱和破碎岩石压实特性试验研究[J]. 煤炭学报，2016，41(9)：2195－2202（FENG Meimei，WU Jiangyu，CHEN Zhanqing，et al. Experimental study on the compaction of saturated broken rock of continuous gradation[J]. Journal of China Coal Society，2016，41(9)：2195－2202 (in Chinese))

[15] 王从颜，付小敏，熊魂，等. 不同围压条件下石英砂破碎特性试验研究[J]. 地质灾害与环境保护，2014(4)：105－109（WANG Congyan，FU Xiaomin，XIONG Hun，et al. Crushing characteristics of quartz sand under different confining pressures[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation，2014(4)：105－109 (in Chinese))

[16] 中华人民共和国铁道部. TB/T2140－2008 铁路碎石道砟[S]. 北京：中国铁道出版社，2008(Ministry of railways of the People's Republic of China. TB/T2140－2008 railway ballast[S]. Beijing：China Railway Publishing House，2008 (in Chinese))

[17] 张振东，李国英. 循环荷载作用下堆石料颗粒破碎特性试验研究[J]. 岩土工程学报，2017，39(8)：1510－1516（ZHANG Zhendong，LI Guoying. Experimental study on particle breakage behaviors of rockfill under cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2017，39(8)：1510－1516 (in Chinese))

[18] 王远，张胜，敖大华，等. 复杂应力路径下堆石料的颗粒破碎特性研究[J]. 岩土工程学报，2018，40(4)：698－706（WANG Yuan，ZHANG Sheng，AO Dahua，et al. article breakage characteristics of rockfills under complex stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2018，40(4)：698－706 (in Chinese))

[19] 郭万里，朱俊高，温彦锋. 对粗粒料 4 种级配缩尺方法的统一解释[J]. 岩土工程学报，2016，38(8)：1473－1480（GUO Wanli，ZHU Jungao，WEN Yanfeng. Unified descriptionfor four grading scale methods for coarse aggregate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2016，38(8)：1473－1480 (in Chinese))

[20] 蔡袁强，赵莉，曹志刚，等. 不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2017，36(5)：1238－1246（CAI Yuanqiang，ZHAO Li，CAO Zhigang，et al. Experimental study on dynamic characteristics of unbound granular materials under cyclic loading with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2017，36(5)：1238－1246 (in Chinese))

[21] 王鹏程. 级配碎石强度与变形特性的研究[D]. 北京交通大学，2016（WANG Pengcheng. Study on the strength and deformation characteristics of crushed rock aggregate[D]. Beijing Jiaotong University，2016 (in Chinese))

[22] Romanov V. 循环列车荷载下道砟碎石-粗粒土永久变形研究[D]. 哈尔滨工业大学，2016（Romanov V. Experimental investigation on permanent deformation of ballast-coarse grained soil induced by cyclic train load[D]. Harbin Institute of Technology，2016 (in Chinese))

[23] Lobo-Guerrero S，Vallejo L E. Discrete element method analysis of railtrack ballast degradation during cyclic loading[J]. Granular Matter，2006，8(3-4)：195.

[24] 井国庆，封坤，高亮，等. 循环荷载作用下道砟破碎老化的离散元仿真[J]. 西南交通大学学报，2012，47(2)：187－191（JING Guoqing，FENG Kun，GAO Liang，et al. DEM simulation of ballast degradation and breakage under cyclic loading[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2012，47(2)：187－191 (in Chinese))

[25] 张振超. 高速铁路有砟道床二维离散元数值模拟[D]. 西安：西南交通大学，2014（ZHANG Zhengchao. Numerical simulation of high-speed railway ballast by two-dimension discrete element method[D]. Xi'an：Southwest Jiaotong University，2014 (in Chinese))

[26] 张徐，赵春发，翟婉明. 循环荷载频率对高速铁路有砟道床累积变形行为的影响[J]. 中国铁道科学，2017，38(1)：1－8（ZHANG Xu，ZHAO Chunfa，ZHAI Wanming. Influence of cyclic loading frequency on cumulative deformation behavior of ballast track bed of high speed railway[J]. China Railway Science，2017，38(1)：1－8 (in Chinese))

[27] Seed H B，Chan C K，Lee C E. Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures [C]. Proceedings of International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor，Michigan，1962：611－636.

Experimental study on mechanical properties of graded aggregate under cyclic loading

ZHANG Wen-li, FENG Mei-mei, WU Jiang-yu

(School of Mechanics and Civil Engineering, State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: Graded aggregate is widely used in railway and highway subgrade. The purpose of this paper is to improve the service performance of subgrade and to optimize the design of subgrade structure. The deformation and breaking laws of graded aggregate at different load frequencies and amplitudes are analyzed by cyclic loading tests. The relationships between load frequency, load amplitude and mechanical parameters (cumulative deformation, modulus of resilience, degree of breakage) of graded aggregate are constructed. The results show that, the load frequency is the main factor affecting the deformation characteristics of graded aggregate. Under the effect of low frequency, the fragmentation rate of graded aggregate is negatively correlated with the frequency, which is mainly related to the time period of loading. There is a positively linear relationship between the fragmentation degree of graded aggregate and the load amplitude. In addition, whether the load frequency or amplitude is changed, the resilience modulus of graded aggregate is always consistent with the rule that the cumulative deformation changes with the load. However, when the load frequency is taken as the influencing factor, the cumulative deformation and resilience modulus of graded aggregate decrease with the increase of degree of crushing, contrary to the variation rule under the influence of load amplitude, which is mainly related to the load acting form and the particle crushing mode.

Keywords: cyclic loading; graded aggregate; cumulative deformation; resilience modulus; fragmentation