

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1977

循环荷载下加筋砾性土填料的动三轴试验分析

王家全¹, 畅振超^{1,2}, 唐毅¹, 唐滢¹

(1. 广西科技大学土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 广西北投交通养护科技集团有限公司, 广西 南宁 530028)

摘 要: 为探究循环动载作用下加筋砾性土填料的动力特性, 在不同加筋层数和围压下对加筋砾性土进行了固结不排水动三轴试验, 研究加筋层数和围压对加筋砾性土动力特性的影响, 并进一步分析了加筋砾性土轴向累积应变发展机制。研究表明: 加筋层数增加时, 轴向累积应变减小, 回弹模量增大, 且加筋作用的影响幅度逐渐衰减; 增大围压时, 土体轴向累积应变减小, 回弹模量和动孔压均随之增大; 随着加筋层数和振次的增加, 滞回曲线逐渐向应力轴靠近, 滞回圈面积逐渐减小, 土体耗能作用减弱。基于安定理论和间接影响带理论, 揭示了加筋作用对轴向累积应变发展的影响机制。建立了能够反映加筋层数的加筋砾性土轴向累积应变预测模型, 其条件参数 α 、 β 、 γ 与加筋层数呈线性关系, 可有效预测循环荷载下加筋砾性土路基沉降变形规律。

关 键 词: 砾性土; 动三轴试验; 加筋土; 动力特性; 轴向累积应变

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 09-2851-10

Dynamic triaxial test analysis of reinforced gravel soil under cyclic loading

WANG Jia-quan¹, CHANG Zhen-chao^{1,2}, TANG Yi¹, TANG Ying¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 2. Guangxi Beitou Transportation Maintenance Technology Group Co., Ltd, Nanning, Guangxi 530028, China)

Abstract: In order to investigate the dynamic characteristics of reinforced gravel soil under cyclic loading, the consolidated undrained dynamic triaxial tests were carried out on the reinforced gravel soil with different numbers of reinforcement layers and confining pressures. The effects of the number of reinforcement layers and confining pressure on the dynamic characteristics of reinforced gravel soil were studied, and the development mechanism of axial cumulative strain of reinforced gravel soil was further analyzed. The results show that when the number of reinforced layers increases, the axial cumulative strain decreases, the rebound modulus increases, and the influence of reinforcement gradually decreases; when the confining pressure is increased, the axial cumulative strain of the soil decreases, and the rebound modulus and the dynamic pore pressure increase accordingly. As the number of reinforced layers and the number of cycle increase, the hysteresis curve gradually approaches the stress axis, and the hysteresis loop area gradually decreases, and the energy consumption of the soil weakens. Based on the stability theory and the indirect influence band theory, the mechanism of the influence of reinforcement on the development of axial cumulative strain is revealed. An axial cumulative strain prediction model of reinforced gravel soil that accounts for the effect of number of reinforcement layers is established. The parameters α , β , γ are linear with the number of reinforcement layers, and the model can effectively predict the deformation of reinforced gravel subgrade under cyclic loading.

Keywords: gravel soil; dynamic triaxial test; reinforced soil; dynamic characteristics; axial cumulative strain

1 引 言

近年来, 加筋土技术因具有限制土体侧向变形

和竖向沉降、提高土体承载能力和稳定性等优点, 在水利、交通、建筑、港口等诸多领域得到广泛应用^[1]。砾性土是砾质土、砾砂、粉砾土、砂砾土和

收稿日期: 2019-11-20

修回日期: 2020-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41962017); 广西自然科学基金项目 (No.2017GXNSFAA198170); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目 (桂教人才 (2020) 6 号); 广西科技大学研究生教育创新计划项目 (No.GKYC201907); 广西大学生创新创业训练计划资助项目 (No.201910594190)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of China(41962017), the Natural Science Foundation of Guangxi Province of China(2017GXNSFAA198170), the High Level Innovation Team and Outstanding Scholars Program of Guangxi Institutions of Higher Learning, China, Graduate Student Education Innovation Projects of Guangxi University of Science and Technology(GKYC201907) and Guangxi College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program(201910594190).

第一作者简介: 王家全, 男, 1981 年生, 博士, 教授, 主要从事加筋结构、地基基础工程等方面的教学与研究工作。E-mail: wjquan1999@163.com

砾类土的统称^[2], 具有良好的力学性能和透水性, 被广泛应用于路基工程中。相比于细粒土, 有关砾性土动力特性的研究较为少见, 相关理论还不够完善。

目前, 国内外学者关于砾性土的静力特性已经进行了较为深入的研究^[3-4], 在砾性土动力特性研究方面也获得了部分成果。在动应力幅值较小时为稳定型曲线, 呈双曲线增长规律, 幅值较大时为破坏型曲线, 呈幂函数增长规律^[5-6]; 土体的轴向累积应变随围压的增大而减小, 随动应力幅值和振次的增大而增大^[7-8]。关于频率对砾性土变形特性的影响, Sun^[9]、Indraratna^[10]等研究得出频率较小时轴向应变发展模式呈塑性稳定型, 较高频率时为塑性破坏型, 且土体的永久变形和劣化程度会随频率的增大而增大。砾性土的回弹特性同样受围压、循环振次、动应力幅值等因素的影响, 随着围压和振次的增大, 回弹模量逐渐增大^[11-12]。

以上均是针对无筋砾性土动力特性所开展的试验研究, 而随着土工合成材料的发展, 加筋土结构在工程中的应用也日益广泛, 与其相关的试验研究也随之展开。Latha 等^[13]进行了加筋砂土动三轴试验, 得出低围压下动模量不会随加筋层数的增加而改变, 但在高围压下动模量随加筋层数的增加而显著增大。Moayed 等^[14]通过加筋砂土动三轴试验得出, 土工布的铺设位置对土体动力特性起主导作用, 当土工织物接近试样顶部时, 其抗液化性能提高。王家全等^[15]研究得出相同动应力下, 增大围压加筋砾性土的动孔压增大, 但孔压比基本在 0.5 左右。

综上所述, 国内外学者针对无筋砾性土的动力特性从围压、动应力幅值、频率等多方面展开研究。而在加筋土方面也有部分学者从加筋方式、加筋层数等因素对加筋土的动力特性进行了探讨。但目前关于加筋土的研究大多是针对细砂、黏土或碎石土, 关于土工格栅加筋砾性土动力特性的试验研究还鲜有报道。故本文以双向土工格栅为加筋材料, 开展加筋砾性土的动三轴试验。研究围压和加筋层数对加筋砾性土轴向累积应变、回弹模量、动孔压等动力特性的影响, 对加筋砾性土轴向累积应变发展机制进行分析, 以期对控制和减小加筋砾性土路基沉降变形给予有益指导。

2 试验装置及试验内容

2.1 试验设备

试验设备采用 GDS 动态三轴测试系统, 该系

统由驱动电机、压力室、荷重传感器、孔压传感器、DCS 数据采集控制盒、围压/反压控制器、GDSLAB 数据采集及控制程序等模块组成。基本技术指标为: 最大轴向动载为 10 kN, 最大围压为 2 MPa, 动载频率调节范围为 0~5 Hz, 可施加波形为正弦波、半正弦波、三角波、方波等。

2.2 试验材料

试验土样取自广西柳州某河堤, 由颗粒分析试验得出, 该砂的不均匀系数 $C_u = 5$, 曲率系数 $C_c = 1.25$, 为级配良好砾砂, 粒组分布情况见图 1 的颗粒级配曲线。砾砂试样的土粒相对密度为 2.67, 最大干密度为 1.81 g/cm^3 , 最小干密度为 1.56 g/cm^3 , 试样控制干密度为 1.77 g/cm^3 , 其相对密度为 0.86, 为密实砾砂。试验所用筋材为双向土工格栅, 格栅网孔尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 横向拉伸屈服力为 15.4 kN/m , 纵向拉伸屈服力为 18.6 kN/m 。

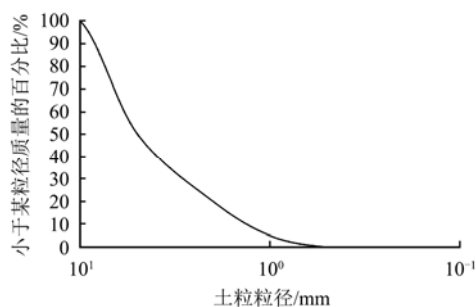


图 1 砂土颗粒级配曲线

Fig.1 Grain-size distribution curve of sand sample

2.3 试验方案

本试验为大尺寸固结不排水动三轴试验, 如图 2 所示, 试样为直径 150 mm、高度 300 mm 的圆柱形试样, 高径比 $H/D = 2.0$, 采用等间距布筋方式。试样饱和采用先二氧化碳饱和与水头饱和, 后反压饱和的联合饱和方法, 当孔隙水压力系数 $B \geq 0.96$

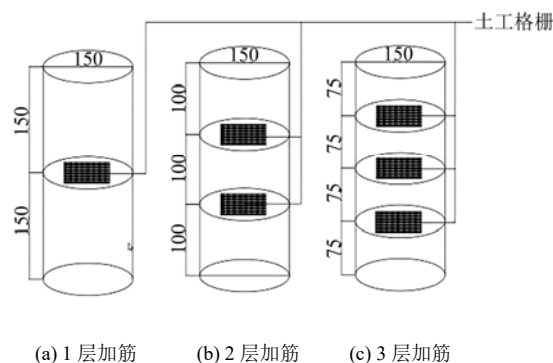


图 2 土工格栅铺设示意图 (单位: m)

Fig.2 Schematic diagrams of geogrid laying (unit: m)

时,认为试样已达到饱和状态。借鉴 Liu 等^[16]关于频率的计算方法 $f = V/L$,以速度 $V = 72 \text{ km/h}$,每节车厢长 $L = 20 \text{ m}$ 计算,取频率 $f = 1 \text{ Hz}$ 。参考黄博等^[17]关于动三轴试验模拟高速列车荷载的研究,循环荷载加载波形选用半正弦波。分别探讨围压为 90 kPa 、动应力幅值为 135 kPa 时,加筋层数对砾性土动力特性的影响规律;以及动应力幅值为 90 kPa ,加筋层数为 3 层时,围压对加筋砾性土动力特性的影响规律。并对不同加筋层数下加筋砾性土滞回曲线的演化规律进行分析,试验条件参数如表 1 所示。

表 1 试验条件参数
Table 1 Testing parameters

试验组别	围压/kPa	动应力幅值/kPa	加筋层数/层
A-1-1	60	90	3
B-1-1	90	90	3
B-2-1	90	135	0
B-2-2	90	135	1
B-2-3	90	135	2
B-2-4	90	135	3
C-1-1	120	90	3

2.4 试验过程

各工况下的试验过程基本类似,主要步骤可分为 6 步进行:①对现场取回的砂样进行筛分试验;②将砂样分 6 层进行装样,通过控制击实次数和试样质量来确保试样有相同的密实度;③装样结束后封闭压力室,然后压力室通水;④进行试样饱和,确保试样达到完全饱和状态;⑤采用固结比 $K_c = 1.0$ 的等向固结模式进行试样固结;⑥待试样固结完成后,进入施加循环荷载阶段,具体动力参数依据各工况试验条件参数而定。

试验的判停标准为轴向累积应变达到 5%或循环荷载加载次数达到 5 000 次,满足其一即可结束试验。设置每一循环的数据采集点数为 20 个,即频率为 1 Hz 时每秒记录 20 个数据点。试样在振动阶段的轴向动应力、动应变、动孔压的变化情况可通过测试系统配套的 GDSLAB 数据采集及控制程序实现数据的实时监测与采集。

3 试验结果分析

3.1 加筋层数对砾性土动力特性的影响

3.1.1 加筋层数对轴向累积应变的影响

为了更好地评价加筋作用对砾性土轴向累积应变和回弹模量的影响程度,参考王家全等^[18]关于加筋砂土静三轴试验的研究,引入两个加筋效果系数 R_{ed} 和 R_{Ed} :

$$R_{ed} = \frac{\varepsilon_{d0} - \varepsilon_{di}}{\varepsilon_{d0}} \quad (1)$$

$$R_{Ed} = \frac{E_{di} - E_{d0}}{E_{d0}} \quad (2)$$

式中: R_{ed} 为轴向累积应变加筋效果系数; $\varepsilon_{d0} - \varepsilon_{di}$ 为 i 层与 0 层加筋时轴向累积应变最终应变差值; ε_{d0} 为 0 层加筋时轴向累积应变最终应变值; R_{Ed} 为回弹模量加筋效果系数; $E_{di} - E_{d0}$ 为 i 层与 0 层加筋时回弹模量最终模量差值; E_{d0} 为 0 层加筋时最终回弹模量值。

如图 3 所示,随着加筋层数的增加, $\varepsilon_d - N$ (N 为振次) 曲线从上至下依次排列,表明加筋层数增加时,轴向累积应变减小。由表 2 可知,加筋试样的 R_{ed} 均为正数,说明各加筋试样中加筋均起到减小轴向累积应变的作用。随着加筋层数的增加 R_{ed} 逐渐增大,3 层加筋时 $R_{ed} = 0.522$,说明 3 层加筋时轴向累积应变减小了约无筋时的一半。加筋层数增加时,加筋作用越大,但随加筋层数的增加, R_{ed} 的增量分别为 0.324、0.121、0.077,呈递减趋势,表明加筋作用对轴向累积应变的影响幅度逐渐衰减。结合间接影响带理论^[19],由于间接影响带的存在,循环加载时筋材附近一定范围的土会同时发生颗粒之间位置的调整,使该处土体的强度和刚度得到加强,土体的整体性也就得到加强,抵抗变形能力也会相应提高,从而减小了累积应变的发展。随着加筋层数的增加,间接影响带增加,从而使试样加强区域扩大,加筋作用更加显著。但加筋层数增加到一定数量时,间接影响带会相互叠加,加筋作用会受到影响,表现出加筋作用对轴向累积应变的影响幅度随加筋层数的增加逐渐衰减的规律。

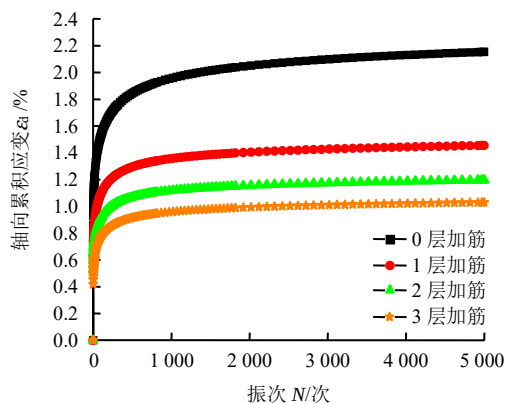


图 3 不同加筋层数下轴向累积应变与振次关系曲线
Fig.3 Curves of cumulated axial strain with the number of loading cycles

表 2 不同加筋层数下的加筋效果系数

Table 2 Reinforcing coefficients for different number of reinforcement layers

加筋层数 λ /层	轴向累积应变加筋效果系数 R_{eh}	回弹模量加筋效果系数 R_{Ed}
0	0.000	0.000 0
1	0.324	0.064 3
2	0.445	0.075 6
3	0.522	0.086 8

参考马少坤等^[5]对饱和圆砾土轴向累积应变的研究, 利用其研究中提到的双曲线模型对加筋砾性土轴向累积应变与振次关系进行拟合后发现, 加筋砾性土的轴向累积应变与振次关系不符合双曲线模型, 说明轴向累积应变与振次关系受土的种类影响, 不同种类土轴向累积应变与振次关系存在差异, 不能直接套用双曲线模型。

鉴于此, 通过 MATLAB 软件对加筋砾性土轴向累积应变与振次关系进行重新拟合分析后, 建立了不同加筋层数下加筋砾性土轴向累积应变预测模型:

$$\varepsilon_d = \frac{N}{\alpha + \beta N + \gamma N^{0.5}} \quad (3)$$

式中: ε_d 为轴向累积应变; α 、 β 、 γ 为与加筋层数相关的条件参数。

表 3 中给出了不同加筋层数下条件参数 α 、 β 、 γ 的取值。对条件参数与加筋层数进行拟合分析后发现, 条件参数 α 、 β 、 γ 与加筋层数 λ 呈线性关系。如图 4 所示, 加筋层数增加时, 参数 α 线性减小, 参数 β 、 γ 线性增大。加筋层数与条件参数的函数方程如下:

$$\alpha = -0.311\lambda - 1.488 \quad (4)$$

$$\beta = 0.16\lambda + 0.47 \quad (5)$$

$$\gamma = 0.525\lambda + 2.016 \quad (6)$$

表 3 不同加筋层数下条件参数及决定系数

Table 3 Parameters and determination coefficients for different number of reinforcement layers

加筋层数 λ /层	条件参数			决定系数 R^2
	α	β	γ	
0	-1.527	0.445	2.075	0.990
1	-1.786	0.660	2.533	0.994
2	-2.017	0.805	2.907	0.995
3	-2.485	0.929	3.700	0.997

基于加筋层数与条件参数间的线性关系, 可通

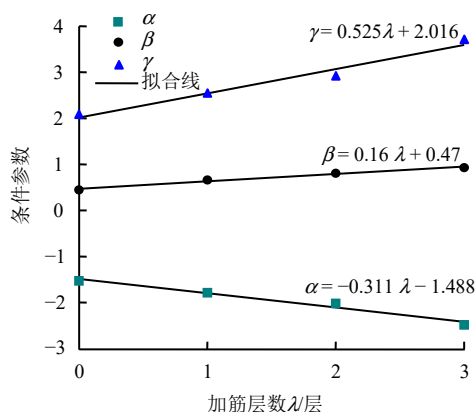


图 4 条件参数与加筋层数关系

Fig.4 Relationships between parameters and the number of reinforcement layers

过加筋层数与条件参数的函数方程, 求出不同加筋层数对应的条件参数, 再通过条件参数和轴向累积预测模型预测不同加筋层数下加筋砾性土对应的轴向累积应变。与其他轴向累积应变预测模型相比, 该模型条件参数获取较为简便, 仅通过加筋层数就可以计算出条件参数, 从而预测不同加筋层数下轴向累积应变随振次的发展趋势。

如图 5 所示, 不同加筋层数下轴向累积应变的模型预测值与试验实测值基本重合, 结合表 3 中的决定系数可知, 各加筋层数下预测模型对应的决定系数均大于 0.99。可以看出, 轴向累积应变模型预测规律与试验实测结果吻合度非常高, 说明该预测模型具有合理性。通过该预测模型和条件参数可为预测加筋砾性土在循环荷载作用下的累积变形提供参考。

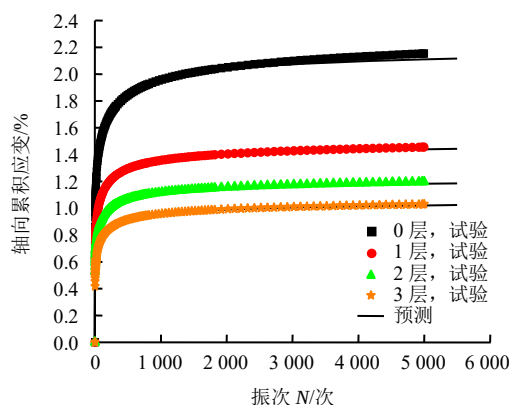


图 5 不同加筋层数下轴向累积应变与振次拟合曲线

Fig.5 Axial cumulative strains and the number of cycles for different number of reinforcement layers

3.1.2 加筋层数对回弹模量的影响

图 6 为不同加筋层数下回弹模量 E_d 与振次 N

的关系曲线。随着动荷载的持续施加, 回弹模量呈略减→增大→稳定的发展趋势。加筋层数增加时, 曲线之间的间距逐渐减小。结合表2中不同加筋层数回弹模量加筋效果系数 R_{Ed} 可知, 加筋层数增加, R_{Ed} 由0.0643增长到0.0868, 说明筋材限制了土体的侧向变形, 提高了试样的整体刚度, 从而使回弹模量增大。

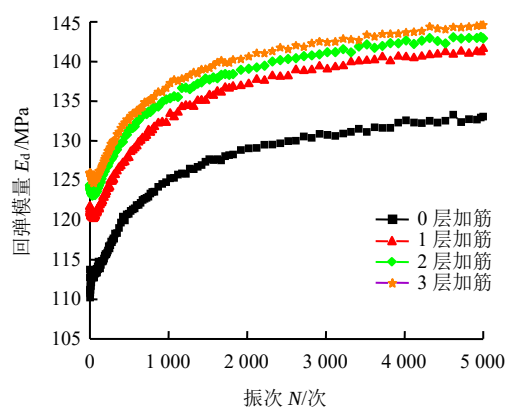


图6 不同加筋层数下回弹模量与振次关系曲线
Fig.6 Relationships between rebound modulus and the number of cycles for different number of reinforcement layers

对比表2中相邻加筋层数 R_{Ed} 发现, 相邻加筋层数 R_{Ed} 差值分别为0.0643、0.0113、0.0112, 未加筋与1层加筋 R_{Ed} 差值最大, 随加筋层数的增加, 加筋对回弹模量的影响幅度会逐渐削弱。分析图6中 E_d-N 曲线的起始位置发现, 加筋不仅影响土体振动过程中的回弹模量, 而且对土体初始回弹模量影响也非常明显; 加筋层数增加, 回弹模量的初始值随之增大, 说明加筋可以提高土体的整体刚度, 且加筋层数增加, 其对回弹模量的影响幅度会减弱。这是由于加筋层数的增加导致间接影响带相互叠加, 干扰了筋土相互作用, 导致加筋对回弹模量增长的幅度逐渐削弱。因此, 工程中可以通过对路基加筋来提高路基土的整体刚度, 减小循环荷载下路基的沉降变形, 但需确定合适的加筋密度, 减少筋材的浪费, 提高经济效益。

3.1.3 加筋层数对动孔压的影响

如图7所示, 不同加筋层数下动孔压 u_d 与振次 N 关系曲线的形状基本一致, 均为稳定型增长模式。在3层加筋时, 动孔压出现跳跃式的增长, 说明3层加筋对动孔压的影响显著, 1层和2层时加筋对动孔压的影响较小。值得一提的是由于大粒径三轴试样存在橡皮膜嵌入效应, 得到的孔压增长并非真实情况, 但加筋效果是相对量, 因而本文分析中可

忽略橡皮膜嵌入效应对加筋效果的影响。

由图8分析可知, 循环荷载作用下不同加筋层数的试样均发生体缩现象, 加载初期体应变 ε_v 发展迅速, 振次 $N=200$ 次后体应变的增长速率会逐渐减小。1层和2层加筋时, 加筋对试样的体应变影响较小, 3层加筋时体应变显著增大, 说明3层加筋时试样体缩现象显著, 土体在循环加载过程中逐渐被振密, 不利于超静孔隙水压力的消散, 导致此时的孔压水平要高于无筋和1层、2层加筋的情况。值得注意的是, 从2层加筋到3层加筋时, 试样的动孔压存在跳跃式增长, 这在体应变中也存在类似现象。当加筋层数小于3层时, 加筋对试样的体积应变影响较小, 大于等于3层加筋时影响显著提高。而动孔压由于受到试样体积应变的影响, 也表现出相同的规律。因此, 在加筋砾性土结构的设计与施工中应注意加筋密度对土体中动孔压的影响, 合理选取加筋密度, 避免因加筋过密而引起孔压升高而降低土工结构的稳定性。

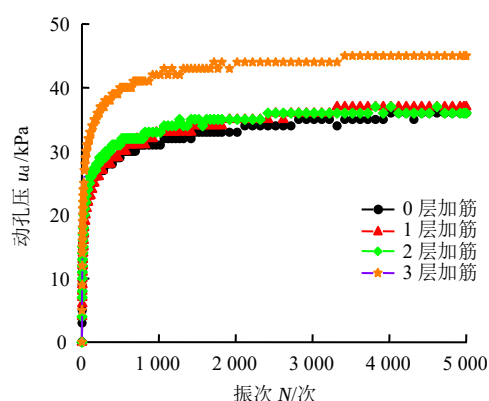


图7 不同加筋层数下动孔压与振次关系曲线
Fig.7 Curves of dynamic pore water pressure and the number of cycles for different number of reinforcement layer

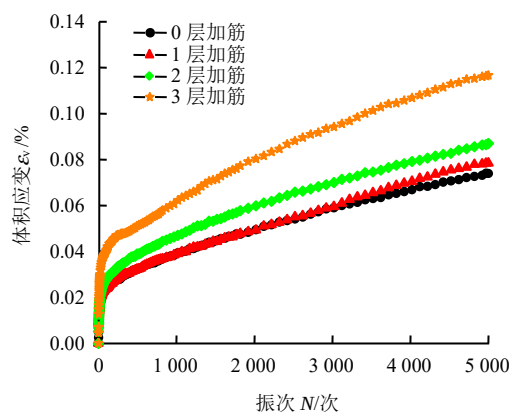


图8 不同加筋层数下体积应变与振次关系曲线
Fig.8 Relationships between volumetric strain and the number of cycles for different number of reinforcement layer

3.2 围压对加筋砾性土动力特性的影响

3.2.1 围压对加筋砾性土轴向累积应变的影响

如图 9 所示, 各围压下 $\varepsilon_d - N$ 关系曲线与不同加筋层数下的 $\varepsilon_d - N$ 曲线相似, 呈稳定型增长规律。围压增大时, 加筋砾性土的 ε_d 会随之减小, 这与刘大鹏等^[20]得出的结论相类似。从图 9 中可以发现, 随着围压的增大, 曲线间的间距随之增大, ε_d 减小的幅度增大。这是因为土工格栅对土体的加筋作用可分为格栅纵横肋对网格内土颗粒的阻力和筋土界面处格栅与土颗粒间的咬合摩擦力和滑动摩擦力两部分, 围压增大时, 筋土界面上的法向应力增大, 导致咬合摩擦力和滑动摩擦力增大, 筋土作用增强。同时, 增大围压也有增大土颗粒间的摩擦力, 提高土体强度与刚度的作用, 两者叠加从而使轴向累积应变的减小幅度增大。

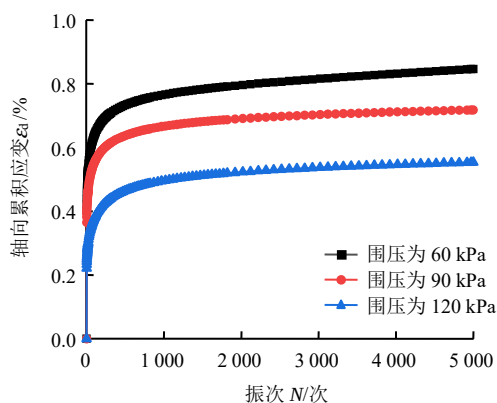


图 9 不同围压下轴向累积应变与振次关系曲线

Fig.9 Axial cumulative strains and the number of cycles under different confining pressures

对比表 4 中施加第 1 次循环荷载与第 5 000 次循环荷载后的 ε_d 得出, 振动过程中约有 50% 的 ε_d 是在第 1 个循环荷载下产生的, 这是由于振动初始阶段, 轴向动偏应力是突然施加, 相应的轴向动应变也会迅速增大。围压增大, 提高了土体的整体刚度, 从而使相同动应力下第 1 个循环产生的 ε_d 随之减小。由此可见, 在同一动应力下, 提高土体围压可以显著抑制土体轴向累积应变的发展。

表 4 不同围压下轴向累积应变对比

Table 4 Comparisons of axial cumulative strain under different confining pressures

围压/kPa	累积应变 ε_d /%	
	$N = 1$ 次	$N = 5\ 000$ 次
60	0.401	0.846
90	0.365	0.718
120	0.221	0.554

3.2.2 围压对加筋砾性土回弹模量的影响

由图 10 发现, 各围压下回弹模量的发展趋势与不同加筋层数下的趋势基本类似。振动初期动回弹模量迅速衰减, 然后又逐渐增大并趋于稳定。这一规律是由于开始施加动荷载后, 土体原有骨架结构遭到破坏, 试样会产生较大的变形, 土颗粒之间会相互错动, 土体发生颗粒重组, 土体颗粒重组过程中, 土体会由开始骨架结构被破坏的状态逐渐向新的稳定状态发展, 土颗粒逐渐趋于密实, 土体刚度增大, 回弹模量衰减到谷值后又会逐渐增大并趋于稳定。

对比图 10 中不同围压下的 $E_d - N$ 曲线发现, 围压增大时, 回弹模量随之增大; 但围压增量均为 30 kPa 下, 高围压时回弹模量的增幅明显小于低围压, 这从曲线间的间距就可以发现。这也反映出围压增大时, 围压对试样回弹模量的影响幅度逐渐衰减。

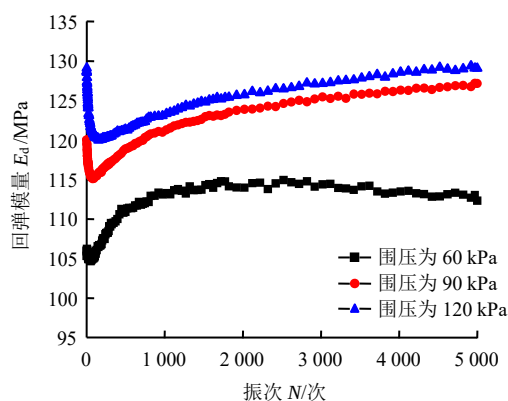


图 10 不同围压下回弹模量与振次关系曲线

Fig.10 Relationships between rebound modulus and number of cycles under different confining pressures

3.2.3 围压对加筋砾性土动孔压的影响

图 11 与表 5 给出了不同围压下动孔压的发展规律。各围压下动孔压随振次的发展规律与不同加筋层数下相似, 呈稳定型增长。随着围压的增大, 动孔压随之增大, 但孔压比 (动孔压 σ_d 与围压 σ_3 的比值) 基本保持不变。而孔压比可以用来表征土体的液化水平, 孔压比为 1 时说明土体已经液化。

从表 5 中孔压比的变化可以发现, 围压虽然对动孔压的影响非常显著, 但对孔压比的影响不大, 即土体的液化水平受围压影响较小。这是由于土体的液化水平主要取决于土体对超静孔隙水压力的消散能力, 换言之, 就是土体边界排水条件和土体内部本身对孔压的消散能力。本试验边界排水条件均为不排水, 试样本身的压实度均相同, 也就是初始孔隙比基本一致, 因此内部排水条件也基本相同,

所以孔压比变化较小。各围压下的孔压比基本稳定在 0.5 左右, 距离液化孔压比还有很大距离, 说明加筋砾性土具有良好的抗液化性能, 在路基工程中作为路基填料用来抵御交通动载具有一定的优越性。

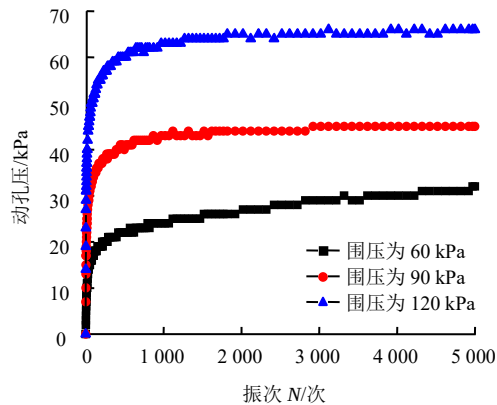


图 11 不同围压下孔压与振次关系曲线

Fig.11 Curves of dynamic pore water pressure and the number of cycles under different confining pressures

表 5 不同围压下的孔压比

Table 5 Pore water pressure ratios under different confining pressures

围压/kPa	最大动孔压/kPa	孔压比
60	32	0.53
90	45	0.50
120	66	0.55

3.3 滞回曲线演化规律分析

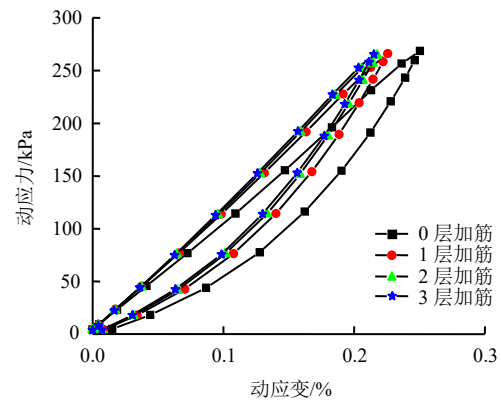
滞回曲线的面积可以反映阻尼比的大小, 能够表征土体耗能作用的强弱, 其倾斜程度可反映土体回弹模量的大小, 描述土体刚度的强弱。因此, 滞回曲线的演化过程能够直观地反映土体回弹模量和阻尼比的发展规律。

3.3.1 不同加筋层数下滞回曲线演化规律

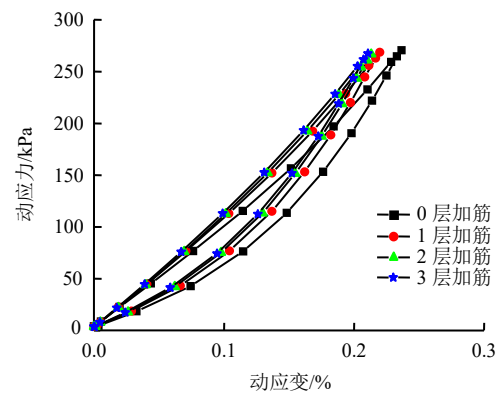
不同加筋层数下的滞回曲线如图 12 所示。各振次下滞回曲线均随加筋层数的增加逐渐向应力轴靠拢, 倾斜程度逐步增大; 且不同加筋层数下滞回圈面积变化显著, 随加筋层数增加, 滞回圈面积逐渐减小, 尤其在振次 $N = 5000$ 次加筋层数为 3 层时滞回圈基本接近线型。

滞回曲线的演化过程反映出加筋砾性土的回弹模量随振次的增加而增大, 阻尼比随振次增加而减小, 这也揭示了图 6 中回弹模量的变化规律。而阻尼比的减小, 会导致交通动载作用下土体耗能作用的衰退, 这不利于土体抗震的要求。

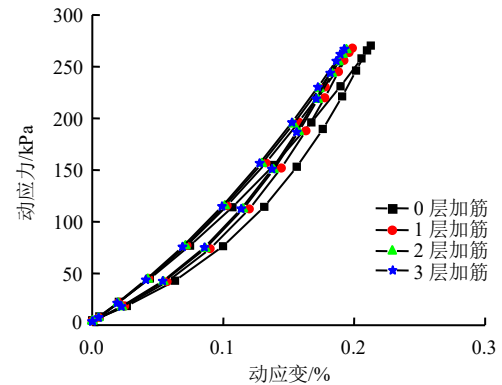
由此可见, 加筋作用可以提高土体的刚度, 对



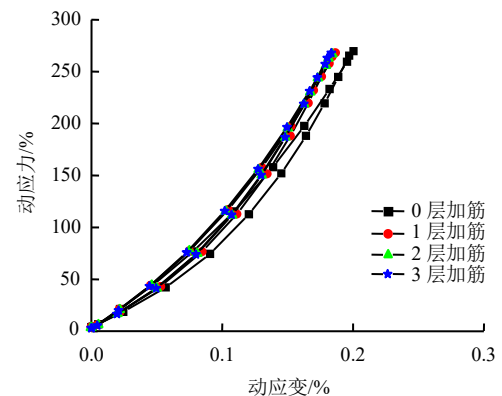
(a) $N = 10$ 次



(b) $N = 100$ 次



(c) $N = 1000$ 次



(d) $N = 5000$ 次

图 12 不同加筋层数下应力-应变滞回曲线

Fig.12 Stress-strain hysteresis curves for different number of reinforcement layers

路基进行加筋处理可以减小路基在交通动载下的沉降,但不利于土体的抗震性能,需要综合考虑两者关系,确定合适的加筋层数。

3.3.2 不同振次下滞回曲线演化规律

图 13 反映了不同加筋层数试样在循环荷载作用下滞回曲线随振次的演变过程。不同振次下滞回圈的面积和倾斜程度会发生变化,随着振次的增加

滞回圈的面积均会减小,而倾斜程度会逐渐增大。

对比不同加筋层数下的滞回曲线发现,0 层加筋时滞回圈的倾斜程度和面积随振次变化最为显著。振次增加时,倾斜程度增大,滞回曲线逐渐靠近应力轴,土体的回弹模量增大;滞回圈的面积随振次增大而减小,滞回圈逐渐趋于线型,土体的阻尼比减小,表现出明显的弹性响应。

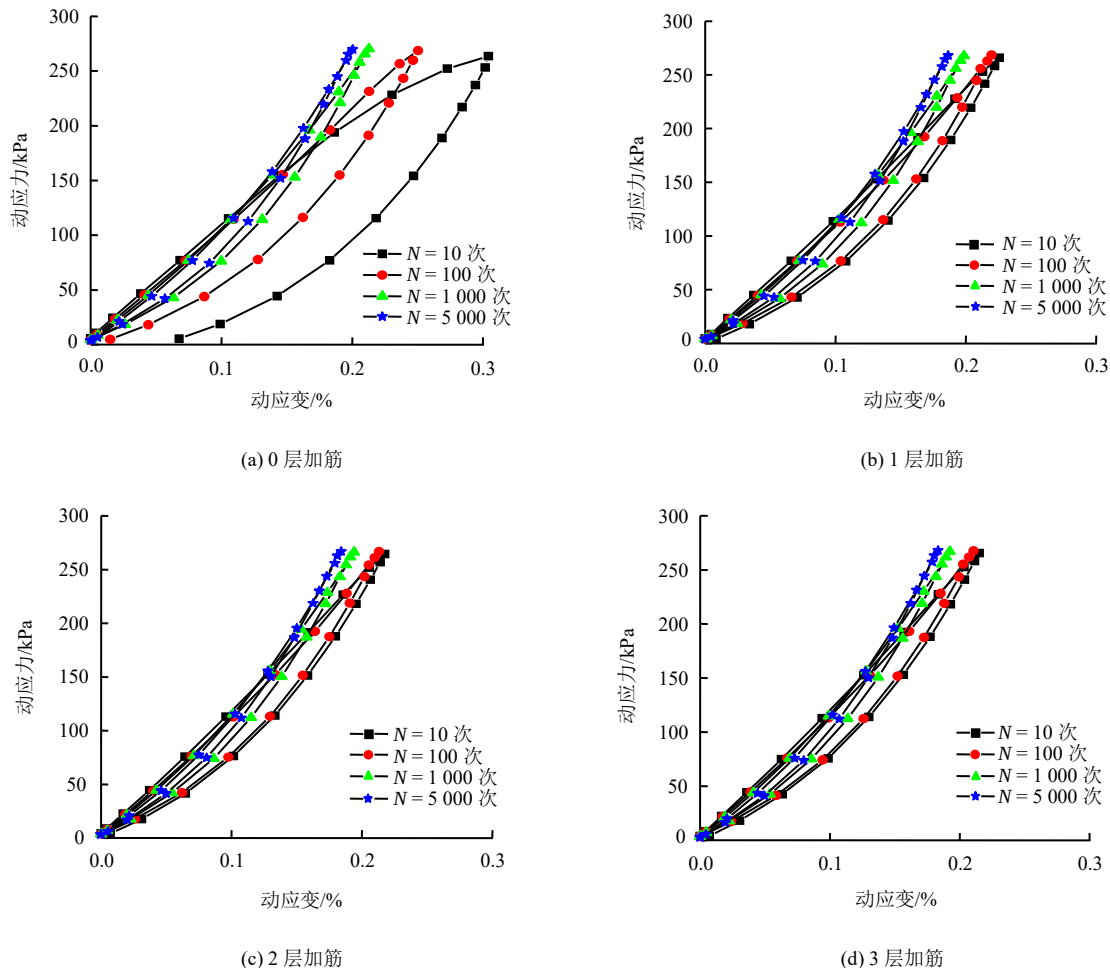


图 13 不同振次下应力-应变滞回曲线

Fig.13 Stress-strain hysteresis curves under different number of cycles

对比图 13(a)~(d)发现,随着加筋层数的增加,各振次下的滞回圈逐渐靠近,且面积逐渐减小,土体的耗能作用逐渐减弱。对比图 13(a)、13(d)发现,图 13(a)中各振次下的滞回圈较为分散,而在图 13(d)中各振次下的滞回圈明显趋于紧密,尤其是振次在 1 000 次和 5 000 次的滞回圈几乎重合。这说明加筋对抑制土体变形有明显效果,且对提高土体抵抗长期循环荷载有显著作用。

3.4 加筋砾性土轴向累积应变发展机制讨论

关于加筋砾性土轴向累积应变发展机制,本文分别针对振次和加筋层数这两部分进行讨论。

由图 3 中 $\varepsilon_d - N$ 关系曲线发现。各加筋层数下

轴向累积应变发展趋势均呈稳定型增长规律。随着振次的增加,轴向累积应变的增长速率不断减小并趋于平稳。结合伍婷玉等^[21]的研究,用安定理论进行解释,循环荷载下加筋土体的应变行为大致可分为 4 个阶段:纯弹性行为、弹性安定行为、塑性安定行为及累积破坏行为。结合图 14 的滞回曲线分析发现,振动初期 ε_d 增长速率较大,且滞回曲线不闭合,说明动载施加后土体产生塑性变形累积,但随着动载的持续施加,土体逐渐被振密,抵抗变形能力增强, ε_d 的增长速率在有限个振次内逐渐下降,土体的弹性变形逐渐体现出来,滞回曲线变密且逐渐闭合,土体轴向累积应变得以达到稳定。这一过

程中有部分能量被土体吸收,之后试样仅产生少量的塑性变形,而呈现出弹性响应,故在此试验工况下土体的变形行为属弹性安定和塑性安定行为。

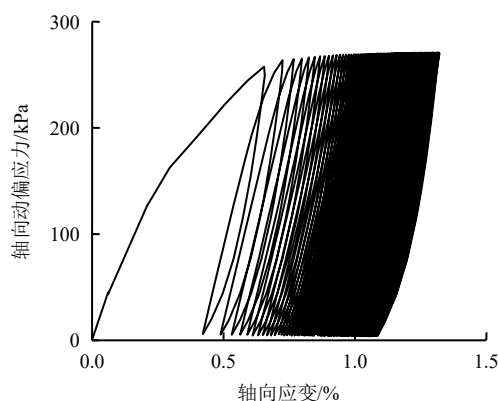


图 14 加筋砾性土滞回曲线发展模式

Fig.14 Hysteresis curve development mode of reinforced gravel soil

随着加筋层数的增加,加筋对 ε_d 的影响幅度会逐渐削弱,从图3中相邻曲线之间的间距也可以发现相同规律。针对这一规律,可以利用间接影响带理论来分析。筋材布置于土体之中,其间接影响带是有一定的范围,若筋材之间的距离较小,各层筋材的间接影响带会相互叠加,筋材与土之间的相互作用会受到一定的干扰作用,这样加筋效果就会降低。由此可见,实际工程中选择加筋层数时,可以在满足承载力和变形的前提下尽量减少加筋层数,这样既可以减少筋材的浪费也能提高经济效益。

4 结 论

(1) 随着加筋层数的增加,轴向累积应变减小,回弹模量增大,加筋作用效果逐渐增强,但增强的幅度逐渐衰减;1层、2层加筋的动孔压与无筋的动孔压较为接近,3层加筋的动孔压出现显著升高。

(2) 轴向累积应变和动孔压随振次的发展趋势均符合稳定型增长规律;建立了能够反映加筋层数的加筋砾性土轴向累积应变预测模型,其条件参数 α 、 β 、 γ 与加筋层数呈线性关系,可有效预测循环荷载下加筋砾性土路基累积沉降规律。

(3) 围压增大时,加筋砾性土的轴向累积应变明显减小,回弹模量和动孔压显著增大;但围压对回弹模量的影响幅度会随围压的增大而衰减,对孔压比的影响则不明显。

(4) 滞回曲线随加筋层数和振次的增加,倾斜程度增大,滞回圈面积减小,反映出土体的回弹模

量增大,阻尼比减小,土体的耗能作用降低,不利于抗震要求。

(5) 加筋砾性土轴向累积应变 ε_d 的发展机制为:① ε_d 随振次逐渐增大并趋于稳定,土体在动载作用下产生塑性变形累积,随着土体的振密,其增长速率逐渐下降并趋于稳定;②加筋作用对 ε_d 的影响幅度随加筋层数的增加而衰减,筋土作用受间接影响带叠加干扰而造成加筋作用幅度的衰减。

参 考 文 献

- [1] 潘洪科, 祝彦知. 地基处理技术与基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
PAN Hong-ke, ZHU Yan-zhi. Foundation treatment technology and foundation pit engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [2] 袁晓铭, 秦志光, 刘荟达, 等. 砾性土层液化的触发条件[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 777-785.
YUAN Xiao-ming, QIN Zhi-guang, LIU Hui-da, et al. Necessary trigger conditions of liquefaction for gravelly soil layers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 777-785.
- [3] 李小刚, 朱长歧, 崔翔, 等. 含碳酸盐混合砂的三轴剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 123-131.
LI Xiao-gang, ZHU Chang-qi, CUI Xiang, et al. Experimental study of triaxial shear characteristics of carbonate mixed sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 123-131.
- [4] 王启云, 张家生, 邓国栋, 等. 高速铁路路基粗粒土 B 组填料剪胀特性的大型三轴试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 731-736.
WANG Qi-yun, ZHANG Jia-sheng, DENG Guo-dong, et al. Large-scale triaxial test study on shear dilatancy of subgrade filler of group B coarse-grained soil of high speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(4): 731-736.
- [5] 马少坤, 王博, 刘莹, 等. 南宁地铁区域饱和圆砾土大型动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 168-174.
MA Shao-kun, WANG Bo, LIU Ying, et al. Large-scale dynamic triaxial tests on saturated gravel soil in Nanning metro area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 168-174.
- [6] 周文权, 冷伍明, 蔡德钧, 等. 循环荷载作用下路基粗粒土填料临界动应力和累积变形特性分析[J]. 铁道学报, 2014, 36(12): 84-89.
ZHOU Wen-quan, LENG Wu-ming, CAI De-gou, et al.

- Analysis on characteristics of critical dynamic stress and accumulative deformation of coarse-grained soil subgrade filling under cyclic loading[J]. **Journal of Railway**, 2014, 36(12): 84-89.
- [7] 冷伍明, 周文权, 聂如松, 等. 重载铁路粗粒土填料动力特性及累积变形分析[J]. **岩土力学**, 2016, 37(3): 728-736.
- LENG Wu-ming, ZHOU Wen-quan, NIE Ru-song, et al. Analysis of dynamic characteristics and accumulative deformation of coarse-grained soil filling of heavy-haul railway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(3): 728-736.
- [8] FU Z, CHEN S, HAN H. Experimental investigations on the residual strain behavior of a rockfill material subjected to dynamic loading[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2017, 29(5): 04016278.
- [9] SUN Q D, INDRARATNA B, NIMBALKAR S. Effect of cyclic loading frequency on the permanent deformation and degradation of railway ballast[J]. **Géotechnique**, 2014, 64(9): 746-751.
- [10] 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.
- [11] 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 Yuan-qiang, ZAO Li, CAO Zhi-gang, 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.
- [12] 李扬波, 张家生, 朱志辉, 等. 分级加载下铁路路基粗粒土动力特性研究[J]. **铁道科学与工程学报**, 2019, 16(3): 620-628.
- LI Yang-bo, ZHANG Jia-sheng, ZHU Zhi-hui, et al. Study on dynamic characteristics of coarse grained soil filler in railway subgrade under stepped axial cyclic loading[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2019, 16(3): 620-628.
- [13] LATHA G M, AM N V. Static and cyclic load response of reinforced sand through large triaxial tests[J]. **Japanese Geotechnical Society Special Publication**, 2016, 68(2): 2342-2346.
- [14] MOAYED R Z, ALIBOLANDI M. Effect of geotextile reinforcement on cyclic undrained behavior of sand[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2018, 104: 395-402.
- [15] 王家全, 畅振超, 黄世斌, 等. 循环动载下土工格栅加筋砾性土动力特性试验分析[J]. **科学技术与工程**, 2019, 19(33): 350-357.
- WANG Jia-quan, CHANG Zhen-chao, HUANG Shi-bin, et al. Experimental analysis of dynamic characteristics of geogrid reinforced gravel soil under cyclic dynamic load[J]. **Science Technology and Engineering**, 2019, 19(33): 350-357.
- [16] LIU J, XIAO J. Experimental study on the stability of railroad silt subgrade with increasing train speed[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(6): 833-841.
- [17] 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 Bo, DING Hao, CHEN Yun-min. Simulation of high-speed train load by dynamic triaxial tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(2): 195-202.
- [18] 王家全, 张亮亮, 陈亚菁, 等. 土工格栅加筋砂土三轴试验离散元细观分析[J]. **水利学报**, 2017, 48(4): 426-434, 445.
- WANG Jia-quan, ZHANG Liang-liang, CHEN Ya-jing, et al. Mesoscopic analysis of reinforced sand triaxial test using PFC^{3D}[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2017, 8(4): 426-434, 445.
- [19] 包承纲. 土工合成材料应用原理与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 129-131.
- BAO Cheng-gang. The principle and application of geosynthetics in engineering[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2008: 129-131.
- [20] 刘大鹏, 杨晓华, 王婧, 等. 砾类土在循环荷载作用下的变形影响因素试验研究[J]. **铁道科学与工程学报**, 2014, 11(4): 68-72.
- LIU Da-peng, YANG Xiao-hua, WANG Jing, et al. Study on influence factors of gravel soil accumulative deformation under cyclic loading[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2014, 11(4): 68-72.
- [21] 伍婷玉, 郭林, 蔡袁强, 等. 交通荷载应力路径下 K_0 固结软黏土变形特性试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2017, 39(5): 859-867.
- WU Ting-yu, GUO Lin, CAI Yuan-qiang, et al. Deformation behavior of K_0 -consolidated soft clay under traffic load-induced stress paths[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(5): 859-867.