

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.110



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



循环荷载作用下小间距加筋土动力响应特性 试验研究

赵建斌¹, 白晓红¹, 谢明星¹, 郑俊杰²

(1. 太原理工大学土木工程学院, 太原 030024; 2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074)

摘要: 基于山西省太行一号风景道K43+175处加筋土桥台工程, 开展不同加筋间距工况条件下加筋砂土的动三轴试验, 分析循环荷载作用下加筋间距对加筋砂土动强度、动剪切模量、阻尼比、累积塑性应变等动力响应特性的影响, 探讨加筋砂土动力响应特性的演化规律, 从而为加筋土柔性桥台复合结构(Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System, GRS-IBS)工程设计中的变形预测和稳定状态评估提供依据。结果表明: 随加筋层数的增加, 加筋砂土动应力-动应变曲线逐渐由双曲线型过渡为直线型, 试样动强度和动模量也随之增大, 且加筋越密, 增幅越明显; 增大围压和增加加筋层数均能减小动剪应变, 提升动剪切模量, 减小阻尼比; 增加加筋层数能有效抑制轴向累积塑性应变随循环荷载作用增长的趋势, 因此, 在GRS-IBS结构中应控制加筋间距, 以提高加筋土的临界循环应力比, 保证其处于长期动力稳定状态。

关键词: 加筋土; 动力特性; 动三轴试验; 加筋间距; 循环荷载

中图分类号: TU431; U416.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2023)06-0125-09

Experimental study on dynamic response characteristics of small-spaced reinforced soil under cyclic loading

ZHAO Jianbin¹, BAI Xiaohong¹, XIE Mingxing¹, ZHENG Junjie²

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: Based on the project of GRS-IBS in Taihang No.1 Tourism Road K43+175 in Shanxi Province, a series of dynamic triaxial tests of reinforced sand with different reinforcement spacings were carried out. To provide reference for deformation prediction and condition evaluation during design process of GRS-IBS, the influence of the reinforcement spacing on the dynamic response characteristics such as dynamic strength, dynamic shear modulus, damping ratio and cumulative plastic strain were analyzed respectively. The evolution patterns of dynamic response characteristics were also discussed. The results show that the type of dynamic

收稿日期: 2022-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(52008285、52178341、52078236); 山西交通控股集团有限公司科技项目(18-JKKJ-23)

作者简介: 赵建斌(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程与公路路基研究, E-mail: zjbhust@hotmail.com。

郑俊杰(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn。

Received: 2022-08-24

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52008285, 52178341, 52078236); Technological Project of Shanxi Transportation Holdings Group Co., Ltd. (No. 18-JKKJ-23)

Author brief: ZHAO Jianbin (1983-), senior engineer, main research interests: geotechnical engineering and highway subgrade, E-mail: zjbhust@hotmail.com.

ZHENG Junjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn.

stress-strain curve changes from hyperbolic to linear with the increase of the number of reinforced layers, and the peak as well as dynamic strength and dynamic modulus are also improved; the denser the reinforcement, the greater the increase would be. Increasing the confining pressure or the number of reinforced layers can reduce both the dynamic shear strain and the damping ratio but increase the dynamic shear modulus. The axial plastic strain can be inhibited effectively by increasing the number of reinforcement layers under the cyclic loading, so that the reinforcement spacing in GRS-IBS structure should be controlled to raise the cyclic stress ratio and maintain the long-term dynamic stability of the reinforced soil.

Keywords: reinforced soil; dynamic characteristics; dynamic triaxial test; reinforcement spacing; cyclic loading

加筋土性能受加筋间距影响显著,当加筋间距减小到一定程度时,加筋土(Geosynthetic Reinforced Soil)可表现出明显的复合特征和优良的承载性能^[1-2]。加筋土柔性桥台复合结构(Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System,简称GRS-IBS结构)是近年针对路-桥过渡段差异沉降提出的一种新型加筋土技术方案,即通过将桥梁上部结构直接搭设在由小间距加筋土(加筋间距一般小于30 cm)构成的GRS-IBS结构上,组成变形协调的路-桥一体化结构,进而缓解“桥头跳车”问题^[3-5]。但由于GRS-IBS结构主要承受车辆引起的循环荷载,其动力响应特性比静力荷载作用下的受力状态更为复杂,若采用静载模式进行结构设计,则与实际工况差异较大,会降低GRS-IBS结构的工程设计精度和可靠性,从而阻碍该技术的进一步推广应用。

通过对试样施加模拟的动态主应力,动三轴试验能较方便地测定试样在承受动态载荷作用下的动力响应,是研究土体动态特性最普遍采用的一种方法^[6]。学者们通过控制加筋材料、加筋层数、固结应力比、动应力幅值、频率等对加筋土体的动强度、动弹性模量、阻尼比、动残余变形等动力特性进行了研究。孙晋^[7]分别用窗纱、软钢丝和塑料模拟土工格栅,对加筋粉土进行了动三轴试验,用以分析加筋路基在交通荷载作用下的动力特性;李文旭等^[8]对加筋黏性土进行了动三轴试验,结果表明,加筋能提升土体的动强度,且围压越大加筋土动力性能提升越明显;Latha等^[9]开展了加筋砂土动三轴试验,认为低围压条件下加筋层数对试样动模量影响较小,而高围压条件下动模量会随加筋层数的增加而显著增大;楼增焕等^[10]对5%石灰掺量的加筋石灰土进行了动三轴试验,得到其临界动应力、累积塑性应变-振次回归系数和动应力-应变回归系数;谢婉丽等^[11]开展了不同动应力、不同围压和不同加筋层数下的加筋黄土动三轴试验,发现在相同动应力作用下加筋黄土轴向累积应变与围压成正比,且试验含水率对黄土动力特性有显著影响。

综上所述,虽然学者们针对加筋土的动力特性开展了大量试验研究,然而针对小间距工况条件下的动三轴试验研究还鲜有报道。加之由于车辆荷载的复杂性及试验中采用筋材和土体类型的差异,试验结果对于实际工程并不具有参考性,无法为GRS-IBS结构的设计计算提供合理参数。为此,笔者依托太行一号国家风景道陵川段(上河一横水)K43+175处 1×8.0 m装配式混凝土简支板桥的GRS-IBS结构工程,开展加筋砂土的室内动三轴试验,研究加筋层数对加筋砂土动强度、动剪切模量、阻尼比、累积塑性应变等动力响应特性的影响,探讨不同加筋工况下加筋砂土动力响应特性的演化规律,从而为GRS-IBS结构工程设计中变形预测和稳定状态评估提供依据。

1 试验方案

依托工程采用平均粒径约为5.5 mm的非连续级配碎石作为桥台的台背填料,加筋材料采用双向聚酯焊接土工格栅(PET-HSG80),网孔尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,肋条宽度为15 mm,极限抗拉强度为74.5 kN/m。考虑到实际工程中填料粒径和加筋材料网孔尺寸都较大,很难制成具有代表性的室内三轴试样,为了制样的便捷性,试验对材料尺寸进行了适当缩减。其中,试验采用干砂,并采用标准砂作为级配碎石的替代材料,不考虑孔隙水压力对试验的影响。通过筛分法确定试验所用标准砂的颗粒级配曲线,如图1所示,根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)判定试样土为中砂,其比重为2.65,平均粒径 $d_{50}=0.32 \text{ mm}$,不均匀系数 $C_u=3.65$,曲率系数 $C_c=1.31$,级配不良。依据规范,分别采用漏斗法和振动锤击法测得砂土的最小孔隙比 $e_{\min}=0.615$,最大孔隙比 $e_{\max}=0.903$,试验试样的孔隙比 e 为0.877,相对密实度 D_r 为91%,干密度 ρ_d 为 1.8 g/cm^3 。

为尽可能反映现场实际工况中的筋-土界面作用,试验采用定制丝径约为0.6 mm、网孔边长为

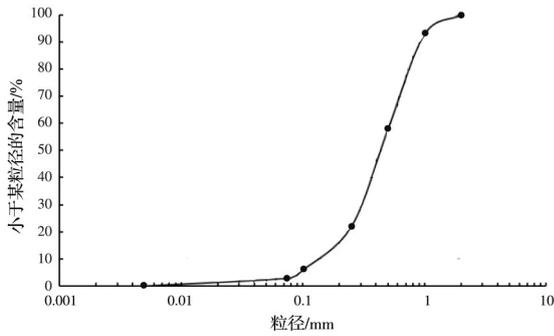


图 1 试验用标准砂的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curve of standard sand for testing

1.5 mm 的 304 不锈钢丝作为加筋替代材料,并采用 DS2-500N 数显式推拉力计对长度为 4 cm、宽度分别为 1、2、3、4 cm 的定制钢丝网进行拉力测试试验,得到其力学特性,如图 2 所示。

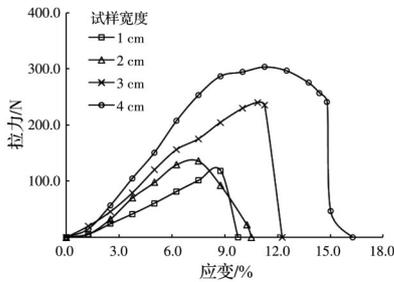


图 2 钢丝网力学特性

Fig. 2 Mechanical properties of steel wire mesh

试验采用英国 GDS 三轴试验系统,主要由压力室、轴向及侧向加压系统、数据采集系统和计算机组成,系统通过 GDSLAB 软件进行试验控制和数据记录,在静态和动态试验中可以非常精确地控制轴向位移和轴向力,从而完成静态和小应变动态三轴试验。试样尺寸直径为 50 mm,高度为 100 mm,采用静压法制样,即分 8 次向砂土制样器中填料,并采用夯击棒将砂土静压至规定高度后整平。试验系统及制样过程如图 3 所示。



(a) 英国 GDS 三轴试验系统 (b) 试样制备

图 3 试验设备及制样

Fig. 3 Test equipment and sample preparation

试样采用 5 种加筋方式,分别为无筋、1 层加筋、3 层加筋、5 层加筋和 7 层加筋,不同加筋层数钢丝网沿试样高度等间距平行铺设,如图 4 所示。其中 H 为试样高度, n 为加筋层数。动力加载采用应力控制方式,各向等压固结后施加循环荷载进行激振。

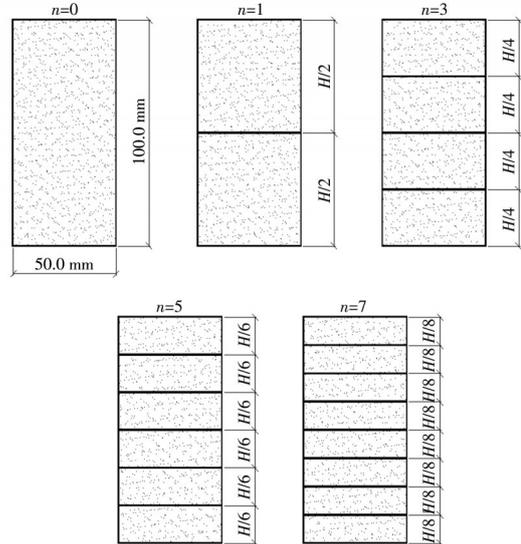


图 4 筋材布设方式

Fig. 4 Layout of reinforcement

加载方案为两种。方案 1:按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)中动力特性试验的相关要求,在固定围压下逐级增加动应力幅值,后一级动应力幅值为前一级的 2 倍,采用正弦波激振,激振频率为 1.0 Hz,波形如图 5 中实线所示。每级动应力幅值振动 10 次,得到加筋土的动强度、动剪切模量、阻尼比等动力响应特性,试验工况见表 1。

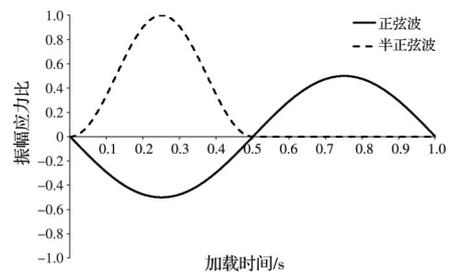


图 5 动荷载曲线

Fig. 5 Dynamic loading curve

方案 2:采用半正弦波简化模拟移动车辆荷载进行激振,波形如图 5 中虚线所示,加载频率根据依托项目设计车速近似取 1.0 Hz^[12-13]。试验中通过改变动应力幅值 σ_d 和围压 σ_c 来设置土体循环应力比 CSR,施加 10 000 次循环荷载或动应变达到 15% 时停止加载,得到加筋土的累积塑性应变,试验工况见表 2。

表 1 方案 1 动三轴试验参数表

Table 1 Parameters of dynamic triaxial test for Scheme 1

试验编号	围压 σ_c /kPa	初始动应力幅值 σ_d /kPa	加筋层数 n
1	50	25	0
2	100	25	0
3	200	25	0
4	50	25	1
5	100	25	1
6	200	25	1
7	50	25	3
8	100	25	3
9	200	25	3
10	50	25	5
11	100	25	5
12	200	25	5
13	50	25	7
14	100	25	7
15	200	25	7

表 2 方案 2 动三轴试验参数表

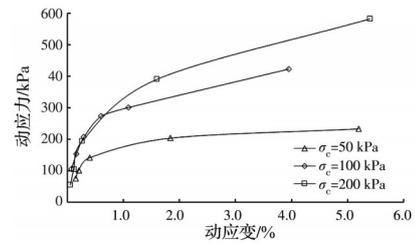
Table 2 Parameters of dynamic triaxial test for Scheme 2

试验编号	围压 σ_c /kPa	动应力幅值 σ_d /kPa	循环应力比 CSR ($\sigma_d/2\sigma_c$)	加筋层数 n
16	30	30	0.50	0
17	30	30	0.50	3
18	30	30	0.50	7
19	30	50	0.83	0
20	30	50	0.83	3
21	30	50	0.83	7
22	30	100	1.67	0
23	30	100	1.67	3
24	30	100	1.67	7
25	60	200	1.67	0
26	60	200	1.67	3
27	60	200	1.67	7
28	30	200	3.33	0
29	30	200	3.33	3
30	30	200	3.33	7

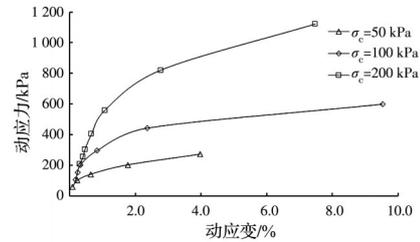
2 试验结果分析

2.1 动应力-动应变曲线

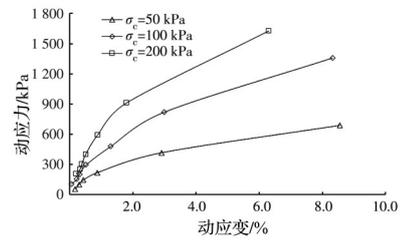
图 6 为不同固结围压水平下加筋土试样的动应力-动应变关系曲线。由图 6 可知,随着动应变的增加,试样动应力逐渐增大;随着固结围压的增加,试样动应力-动应变曲线逐渐抬升,动应力峰值也随之增大,而达到同样动应力所产生的动应变则相应减小。从图中还可以看出,相较于增大围压,增加加筋层数后试样动应力-动应变曲线峰值和斜率均明



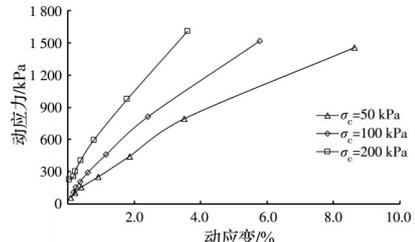
(a) $n=0$



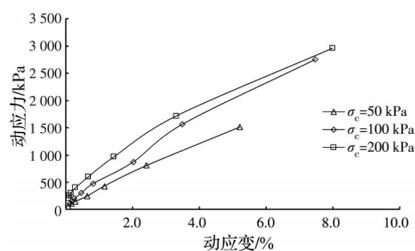
(b) $n=1$



(c) $n=3$



(d) $n=5$



(e) $n=7$

图 6 不同围压下试样动应力-动应变曲线

Fig. 6 Dynamic stress-strain curve under different confining pressures

显增大,特别是当加筋层数 n 达到 5 时,试样动应力-动应变曲线由双曲线型演变为直线型,基本呈线性增长趋势,且在 8% 的应变条件下仍能承受近 3 000 kPa 的循环荷载,动应力峰值较不加筋试样提升了约 5 倍,表现出较高的强度和韧性,这也是加筋土结构抗震性能优良的主要原因。可见,加筋作用不仅

能够保持试样的整体性、控制试样变形,筋材也能够通过自身变形以应变储能的形式吸收一部分动荷载能量,从而大幅改善加筋土试样的动强度特性,并且加筋间距越小,动强度提升作用越明显。

从图 7 可更直观地看出相同围压条件下加筋对试样动强度峰值的提升作用,且围压越小,动强度峰值增幅越大,加筋效果越显著。另外,在围压较小的情况下($\sigma_c=50、100$ kPa),布设一层筋材的试样和不加筋试样的动应力-动应变曲线较为接近,而加筋层数达到 3 层后试样动强度峰值才明显增大。可见,只有当筋材布设间距减小到一定程度后,加筋土才能体现出较好的加筋效果。

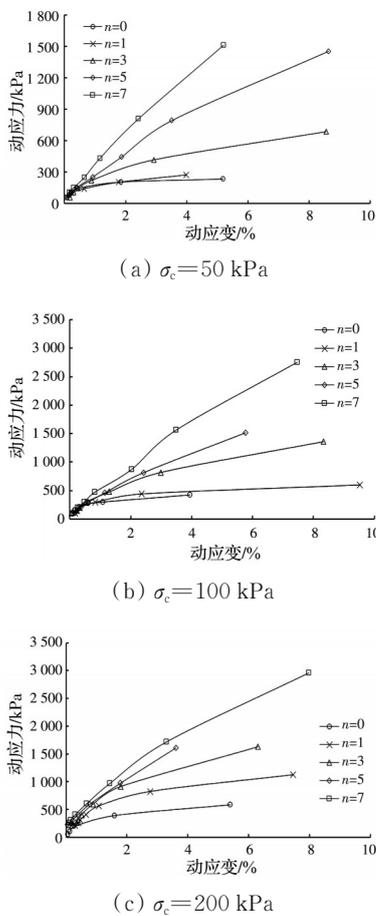


图 7 不同加筋层数下试样动应力-动应变曲线
Fig. 7 Dynamic stress-strain curve of samples with different reinforcement layers

2.2 动剪切模量

图 8 为在 3 种固结压力下加筋砂土动剪切模量 G_d 随动剪应变幅值衰减的曲线对比,可反映大应变条件下加筋砂土的动力特性。由图 8 可知,在相同动应力幅值处,试样动剪切模量 G_d 呈倾斜向下分布,说明随着循环加载次数的增加,动剪应变呈增大趋势,而动剪切模量 G_d 呈逐渐减小趋势。随着动

应力幅值的增加,动剪应变也随之增大,动剪切模量 G_d 则随之减小,并逐渐趋于稳定。

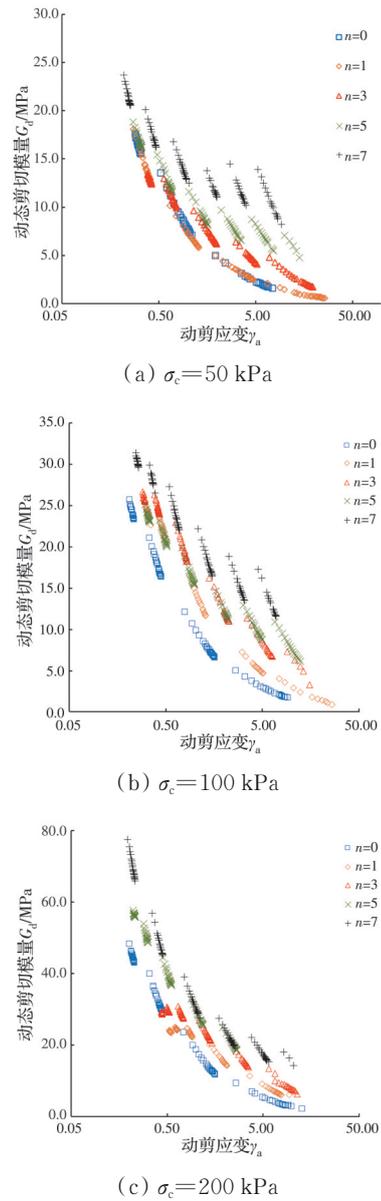


图 8 动剪切模量试验曲线
Fig. 8 Test curve of dynamic shear modulus

另外,增大试样围压,动剪应变减小,而动剪切模量 G_d 增大;随着加筋层数的增加,在相同围压和动荷载作用下,动剪切模量 G_d 也有所提升,特别是在加筋层数 n 大于 5 的条件下,动剪切模量 G_d 有较大幅度提升,说明小间距加筋试样可以有效限制土体的侧向变形,表现出明显的复合体力学特性和优良的抗震性能。

2.3 阻尼比

试样的阻尼比 λ 可通过滞回曲线面积直观反映,表征在动力荷载作用下试样吸收能量的能力,滞回曲线的倾斜度可反映试样的动弹性模量 E_d ^[14]。图 9

为在 50、100 kPa 固结压力下未加筋砂土滞回圈曲线随动剪应力幅值变化的演化过程,为便于分析,图中对各级周期性动荷载作用下的动剪应力曲线进行了初始化处理。由图 9 可见,各级周期性动荷载作用下动剪应力-动剪应变曲线形成闭合的滞回圈,试样在周期性动荷载一次循环中吸收的能量与该循环中最大剪应变对应的势能之比为试样的阻尼比 λ ,随着动剪应力幅值的增加,滞回圈面积及阻尼比 λ 也逐渐增大;对比图 9(a)、9(b)可以看出,围压增大后,试样滞回圈面积有所减小,而轴线斜率增大,说明试样阻尼比 λ 随着围压的增大而减小,动弹性模量 E_d 随着围压的增大而增大。

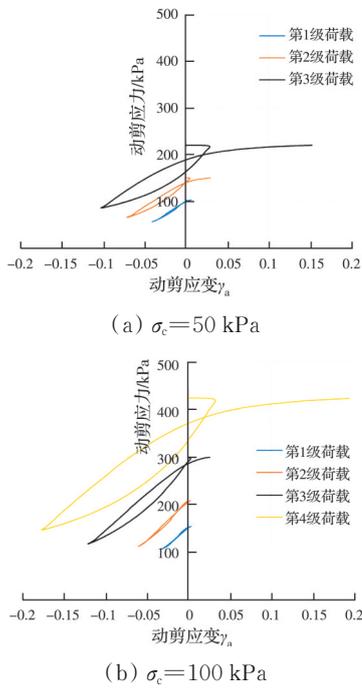


图 9 未加筋砂土滞回圈曲线
Fig. 9 Hysteretic loop of unreinforced sand

图 10 为在 50 kPa 固结压力下不同加筋层数试样滞回圈曲线随动剪应力幅值变化的对比。由图 10 可见,随着加筋层数的增加,试样所能承受的荷载级数逐渐增大,而随着周期性动荷载作用的增大,滞回圈面积也随之大幅增加。但在相同幅度的动荷载作用下,加筋后试样的滞回圈面积略有减小,形态由“梭形”向“弓形”过渡,滞回曲线的倾斜度略有增大,试样的塑性变形能力逐渐降低,刚度相应增大,其变化趋势与增加试样围压时的工况相似,只是变化幅度更为平缓。

图 11 为不同加筋层数试样动阻尼曲线的对比。从图 11 可以看出,阻尼比 λ 与动剪应变关系曲线具有较大的离散性,但试验数据拟合出的变化趋势曲

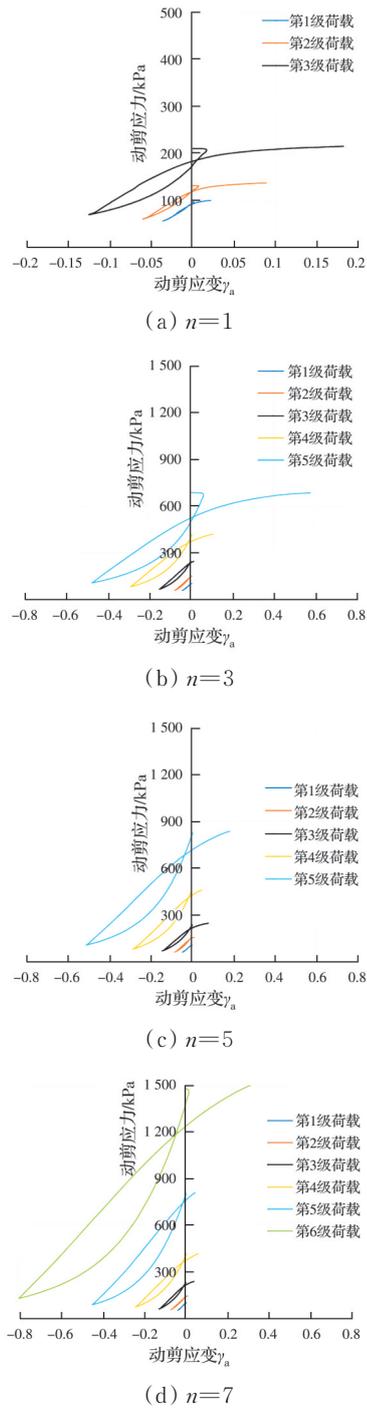


图 10 $\sigma_c=50$ kPa 时不同加筋层数试样滞回圈曲线
Fig. 10 Hysteretic loop of samples with different number of reinforcement layers under $\sigma_c=50$ kPa

线表明,随着动剪应变的增加,阻尼比 λ 呈逐渐增大的趋势。试样加筋后,阻尼比 λ 相对减小,这是因为试样加筋后限制了土体的侧向变形,在循环荷载作用下试样所能吸收的能量更小。同时,图中显示,在动剪应变较小的情况下,筋材还未发生屈服或破坏,加筋层数对阻尼比 λ 的影响不特别显著。

2.4 累积塑性应变

图 12 为固结压力 $\sigma_c = 30$ kPa 时不同循环应力

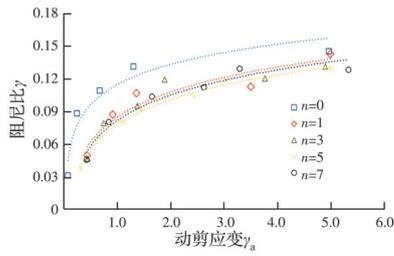
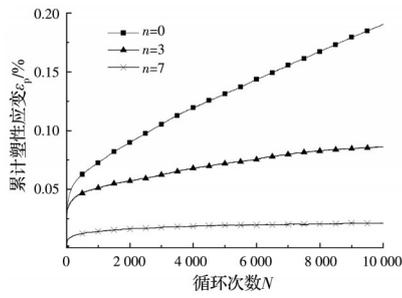


图 11 不同加筋层数试样阻尼比曲线对比

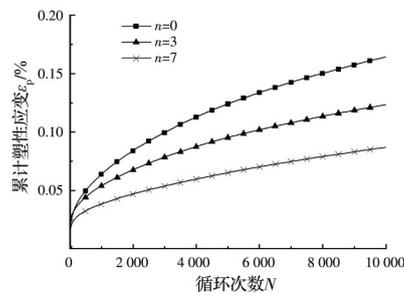
Fig. 11 Damping ratio of samples with different number of reinforcement layers

比条件下加筋试样轴向累积塑性应变 ϵ_p 与加载次数 N 的关系曲线, n 为加筋层数。由图 12 可知, 随着加载次数 N 的增加, 轴向累积塑性应变 ϵ_p 均呈增加趋势, 加载初期轴向累积塑性应变 ϵ_p 发展迅速, 其后未加筋试样的曲线增幅依然呈较大增长趋势, 在振次

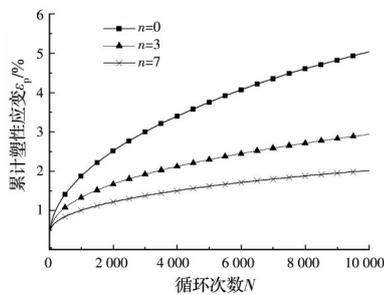
达到 10 000 次时仍未稳定, 呈增量破坏趋势, 特别是当 $R_c=3.33$ 时, 在加载初期, 该试样轴向累积塑性应变即迅速增加直至发生破坏。而加筋试样的轴向累积塑性应变 ϵ_p 则呈稳定增长型曲线, 随着振次的增加, 塑性应变累积速率逐渐减小并趋于动力稳定状态, 说明在循环荷载作用下试样先被逐渐压密, 其后, 筋材附近一定区域内土体颗粒的移动和旋转都受到限制, 从而提高了该区域内土体的稳定性, 其强度和刚度都随之加强, 从而有效抑制了试样累积塑性应变的发展。特别是当加筋层数 n 为 7 时, 加筋土试样表现出良好的复合体特性, 在循环荷载作用下, 其动能基本全部转化为弹性变形能而几乎不产生累积塑性变形, 因此能更好地承受循环荷载作用。



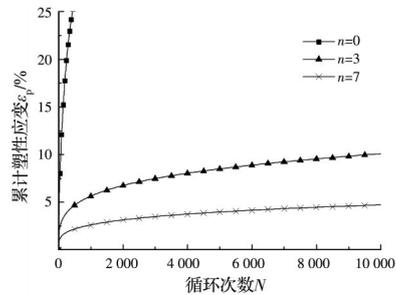
(a) $R_c=0.50$



(b) $R_c=0.83$



(c) $R_c=1.67$



(d) $R_c=3.33$

图 12 $\sigma_c=30$ kPa 条件下试样累积塑性应变与加载次数关系曲线

Fig. 12 The relationship between accumulated plastic strain versus loading times under $\sigma_c=30$ kPa

图 13 为在 8 000 次循环荷载作用下不同试样循环应力比与累积塑性应变关系曲线。由图 13 可以看出, 随着循环应力比 R_c 的增大, 试样轴向累积塑性应变 ϵ_p 均呈明显增长趋势。加筋层数 $n=0$ 和 $n=3$ 的曲线在 $R_c=1.67$ 后出现明显拐点, 说明试样存在一个临界循环应力比, 当试样所受循环荷载条件大于该限值时, 试样塑性应变累积速率逐渐增大, 直至试样发生大变形破坏; 当试样所受应力条件小于该限值时, 循环荷载作用下试样不断被压密, 直至不再产生新的塑性变形, 达到动力稳定状态。加

筋层数 $n=7$ 的曲线增长最为平缓, 并未出现明显拐点, 说明其临界循环应力比远大于另外两种工况。

图 14 为固结压力 p 对试样轴向应变与加载次数关系曲线的影响。由图 14(a) 可知, 在相同轴向循环应力 σ_d 下, 固结压力 p 越大, 试样的轴向塑性应变 ϵ_p 越小, 动力稳定性越好, 说明围压增大可使土颗粒间相互约束更紧密, 提升整个加筋土结构的强度和刚度。图 14(b) 表明, 在相同循环应力比 R_c 下, 同时增大轴向循环应力 σ_d 和固结压力 p , 试样的轴向塑性应变 ϵ_p 也显著增加, 说明轴向循环应力幅值 σ_d

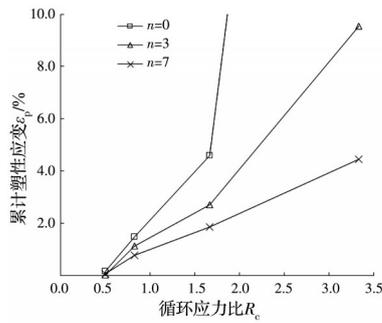
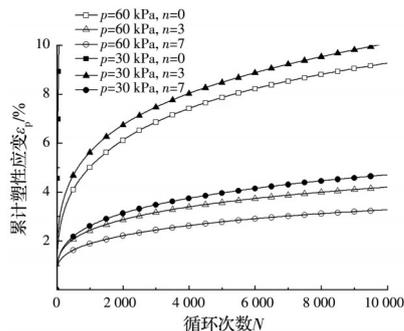
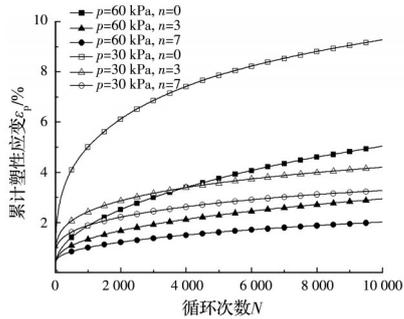


图 13 $N=8\ 000$ 次时循环应力比与累积塑性应变关系曲线
 Fig. 13 The relationship of cyclic stress ratio versus accumulated plastic strain when $N=8\ 000$



(a) $\sigma_d=200\ \text{kPa}$



(b) $R_c=1.67$

图 14 固结压力对试样轴向应变与加载次数关系曲线的影响

Fig. 14 Influence of consolidation pressure on the relationship of axial strain versus loading times

对试样轴向塑性应变 ϵ_p 的发展规律影响更显著。同样地,加筋后试样的轴向塑性应变 ϵ_p 均明显减小,特别是加筋层数 $n=7$ 时,轴向塑性应变 ϵ_p 呈逐渐收敛趋势,试样基本处于长期动力稳定状态。

3 结论

1)加筋砂土动应力随着动应变的增加而逐渐增大,曲线均为应变强化型,随着围压的增大,试样动应力-动应变曲线的峰值和斜率也随之增大;随着加筋层数的增加,加筋砂土动应力-动应变曲线逐渐由双曲线型过渡为直线型,试样动强度和动模量也

随之增大,且加筋越密,增幅越明显。

2)增大围压和增加加筋层数均能有效限制试样的侧向变形,从而减小动剪应变,提升动剪切模量;试样阻尼比随着动剪应力幅值的增加而逐渐增大,随着围压的增大而减小,试样加筋后阻尼比则相对减小,但在小应变条件下,加筋层数对阻尼比的影响并不显著。

3)增加加筋层数可有效抑制循环荷载作用下试样轴向累积塑性应变的发展趋势,为保证 GRS-IBS 结构中加筋土在行车动载作用下处于长期动力稳定状态,应根据桥梁结构荷载水平控制加筋间距,以提高加筋土的临界循环应力比,避免桥台结构过量沉降的发生。

参考文献

[1] 徐超, 罗敏敏. GRS 结构与 MSE 结构的性能差异及评价方法[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(3): 1-7.
 XU C, LUO M M. Differences in performance and evaluation methods between geosynthetic reinforced soil structure and mechanically stabilized earth structure [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(3): 1-7. (in Chinese)

[2] SAGHEBFAR M, ABU-FARSAKH M Y, ARDAH A, et al. Full-scale testing of geosynthetic-reinforced, soil-integrated bridge system [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2656(1): 40-52.

[3] 罗敏敏, 徐超, 杨子凡. 土工合成材料加筋土柔性桥台复合结构及应用[J]. 土木工程学报, 2019, 52(Sup1): 226-232.
 LUO M M, XU C, YANG Z F. Geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system and its applications [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(Sup1): 226-232. (in Chinese)

[4] 赵建斌, 白晓红, 郑俊杰, 等. 加筋土桥台柔性复合结构设计方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(4): 1-9.
 ZHAO J B, BAI X H, ZHENG J J, et al. Design method of geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering. 2023, 45(4): 1-9.(in Chinese)

[5] ADAMS M T, NICKS J, STABILE T, et al. Geosynthetic reinforced soil integrated bridge system synthesis report [R]. McLean, VA: The US Federal Highway Administration, 2011.

[6] 罗文俊, 王海洋, 马斌, 等. 单向循环荷载作用下饱和重塑红黏土的动力特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 1-9.

- LUO W J, WANG H Y, MA B, et al. Dynamic characteristics of saturated remodeling red clay under uniaxial cyclic loading [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(2): 1-9. (in Chinese)
- [7] 孙晋. 加筋土动力特性试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
SUN J. The experimental study on the dynamic behavior of reinforced soil [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] 李文旭, 王宁, 韩志型, 等. 土工格栅加筋黏性土动力性能的试验研究[J]. *工业建筑*, 2011, 41(7): 66-69, 113.
LI W X, WANG N, HAN Z X, et al. Test research on dynamic behavior of geo-grid reinforced clays [J]. *Industrial Construction*, 2011, 41(7): 66-69, 113. (in Chinese)
- [9] LATHA G M, KRISHNA A M. Seismic response of reinforced soil retaining wall models: Influence of backfill relative density [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(4): 335-349.
- [10] 楼增焕. 交通循环荷载下加筋灰土动三轴试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
LOU Z H. Dynamic triaxial test of reinforced lime-stabilized soil under cyclic traffic loads [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [11] 谢婉丽, 薛建功, 常波. 加筋土动力特性的三轴试验研究[J]. *灾害学*, 2008, 23(Sup1): 120-124.
XIE W L, XUE J G, CHANG B. Triaxial test on dynamic properties of reinforced soil [J]. *Journal of Catastrophology*, 2008, 23(Sup1): 120-124. (in Chinese)
- [12] 黄珏皓, 王应武, 陈健, 等. 变围压循环荷载作用下超固结软黏土变形特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(Sup2): 245-248.
HUANG J H, WANG Y W, CHEN J, et al. Experimental study on deformation behaviors of overconsolidated clay under cyclic confining pressure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(Sup2): 245-248. (in Chinese)
- [13] 凌建明, 王伟, 邬洪波. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(11): 1315-1320.
LING J M, WANG W, WU H B. On residual deformation of saturated clay subgrade under vehicle load [J]. *Journal of Tongji University*, 2002, 30(11): 1315-1320. (in Chinese)
- [14] BATHURST R J, CAI Z. In-isolation cyclic load-extension behavior of two geogrids [J]. *Geosynthetics International*, 1994, 1(1): 1-19.

(编辑 胡英奎)