

马林,刘亚明,孟秀元,等.离石加筋黄土动弹性模量变化规律研究[J].地震工程学报,2020,42(4):1007-1012.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.1007

MA Lin,LIU Yaming,MENG Xiuyuan,et al.Change Law of the Dynamic Elastic Modulus of Reinforced Loess in Lishi Area [J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(4):1007-1012.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.1007

离石加筋黄土动弹性模量变化规律研究

马 林¹, 刘亚明¹, 孟秀元², 高国刚², 王洪峰²

(1. 山西省交通科技研发有限公司, 山西 太原 030032;

2. 山西路桥集团阳蟒高速公路有限责任公司, 山西 晋城 048107)

摘要: 针对目前加筋土动弹性模量演化机理不明确、测试过程复杂等问题,结合 GDS 动三轴,开展不同因素(围压、含水率、加筋材料、加筋层数)影响下加筋土动弹性模量测试试验。测试结果表明:(1)加筋土的动弹性模量受含水率、围压、加筋材料和加筋层数等多种因素影响,其影响的敏感性等级为含水率>围压>加筋层数>加筋材料;(2)加筋土的动弹性模量主要受筋材与土颗粒的联结作用和排列方式影响;(3)提出不同因素影响下动弹性模量衰减的预测模型,其表达式符合双曲线规律。研究结论对路基设计、处治具有一定的指导意义。

关键词: 加筋黄土; 动三轴; 弹性模量; 影响因素; 预测模型

中图分类号: TU452; TU472.34

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-1007-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.1007

Change Law of the Dynamic Elastic Modulus of Reinforced Loess in Lishi Area

MA Lin¹, LIU Yaming¹, MENG Xiuyuan², GAO Guogang², WANG Hongfeng²

(1. Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd., Taiyuan 030032, Shanxi, China;

2. Shanxi Road and Bridge Group, Yangmang Expressway Co., Ltd., Jincheng 048107, Shanxi, China)

Abstract: In view of the unclear evolution mechanism of the dynamic modulus of reinforced soil and the complicated test process, combined with the GDS dynamic triaxial test, this study conducted a dynamic elastic modulus test of reinforced soil under the influence of different factors, i.e., confining pressure, water content, reinforced materials, and reinforced layers. Three conclusions were drawn: (1) The dynamic elastic modulus of reinforced soil was affected by water content, confining pressure, reinforced materials, and number of reinforced layers, in which the influence order is as follows: water content > confining pressure > number of reinforced layers > reinforced material. (2) The dynamic elastic modulus of reinforced soil is mainly affected by the coupling and arrangement of the reinforced materials and soil particles. (3) This paper proposed a prediction model of dynamic elastic modulus attenuation under the influence of different factors,

收稿日期: 2019-06-30

基金项目: 山西省应用基础研究项目(201701D221213); 山西省重点研发计划项目(201603D321118); 山西省交通厅建设科技项目(17-2-03); 国家自然科学基金面上项目(41772285)

第一作者简介: 马 林(1986—),男,陕西杨凌人,硕士,工程师,从事黄土力学与工程研究工作。E-mail:327759595@qq.com。

通信作者: 刘亚明(1990—),男,山西晋城人,硕士,工程师,从事黄土路基与工程研究工作。E-mail:498528170@qq.com。

and its expression conformed to the hyperbolic law. The conclusion has a certain guiding significance for the design and treatment of roadbeds.

Keywords: reinforced loess; dynamic triaxial; elastic modulus; influencing factor; prediction model

0 引言

随着土木工程不断发展,越来越多的交叉技术应运而生。加筋黄土即是其中一种。目前黄土加筋广泛应用于路基拓宽处治、高填方路基沉降防治、路桥连接处桥头跳车处理及高边坡稳定性预防等方面,土体加筋以其承载力高、韧性优良、抗拉拔能力强等优点,在上述方面表现出了较好的力学性能,受到了许多学者的关注。如魏红卫等^[1]研究了筋材拉伸模量、加筋层数、土体压实度及竖向压力对加筋土体抗剪强度和应力—应变特性的影响。姚攀峰等^[2]建立了非饱和土的黏聚力和内摩擦角与含水率的函数关系。傅华等^[3]通过室内大三轴试验研究了加筋材料、加筋方式、材料和密实度对加筋效果的影响,探讨了在不同影响因素下加筋土试样强度的变化规律。张孟喜等^[4]通过三轴试验研究了砂土的单层立体加筋性状,指出立体加筋不仅能提高砂土的黏聚力,而且能增加砂土的内摩擦角。龙玉民^[5]研究了含水率对重塑黏性土 c 、 φ 值的影响因素。林鸿州等^[6]从基质吸力的角度研究了含水率对非饱和土抗剪强度的影响。丁万涛等^[7]通过室内三轴试验研究了含水率对加筋膨胀土的影响。与原状黄土^[8-10]和素压实黄土^[11-14]的动力学性质不同,加筋黄土的动力学性质受加筋层数、筋材性质等因素的影响较大。

通过文献调研发现,对加筋土结构在静力作用下的变形破坏特征研究已颇为成熟,但对其在动力作用下的性能尚处于积极探索阶段,甚至已经出现设计理论远远落后于工程应用的现象。主要原因如下:(1)加筋土结构及其所受外力荷载影响因素复杂。加筋土结构动力特性不仅和自身的筋材、面板、填土的性质有关,而且受外界动力荷载振幅、频率、加速度放大系数等因素的影响。其中任何一个因素的改变都会影响加筋土结构的性能。(2)动力作用下加筋土结构的土压力计算理论还不成熟,大多计算仍在一定的假设前提下进行。因此,在近期全球地震频发和国家大力发展高速公路等基础设施的背景下,研究加筋土结构在动力作用下的性能已成为必然趋势^[15]。

综上所述,本文以山西离石黄土为研究对象,通过笼布、软窗纱、硬窗纱对黄土进行加筋,研究不同

工况下加筋黄土的动力特性,研究成果可为类似工程提供一定的参考依据。

1 离石黄土的基本物性指标

本次试验用土取自山西离石地区某黄土边坡,土体颗粒粉粒含量较高,属黄土状粉土。通过室内试验测试了其基本的物理指标,如表 1 所列。

表 1 离石黄土的基本物性指标

Table 1 Basic physical properties of Lishi loess

土样名称	含水率 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	液限 /%	塑限 /%
离石黄土	13.6	1.74	39.2	20.4

2 加筋黄土的动力试验方案

本次试验通过英国 GDS 动三轴试验系统完成。该系统测试精度较高、数据误差较小,得到的结果可有效反映加筋黄土的动力特性。本次试验拟开展围压(100 kPa、200 kPa、400 kPa)、含水率(8.6%、11.9%、16%)、不同筋材(笼布、软窗纱、硬窗纱)、加筋层数($N=0$ 、 $N=1$ 、 $N=2$)下加筋黄土的动力特性,重点分析不同影响因素对加筋黄土的动弹性模量的影响规律,揭示加筋黄土在动力作用下的工作机理。

本次试验选取正弦波进行加载,在对加筋试样施加动荷载之前,先让试样进行 1 小时固结,固结完成后,由小到大逐级施加动荷载,每级动荷载下振动 10 个循环,单个循环记录 10 个数据点,以便绘制滞回曲线。

3 测试结果分析

3.1 围压对土体动弹性模量的影响

以加筋层位为 2-4-2、筋材为硬窗纱、含水率为 11.9%(48 # $\sigma_3=100$ kPa、50 # $\sigma_3=200$ kPa 和 51 # $\sigma_3=400$ kPa)条件下的试验为例,分析了不同围压对土体动弹性模量的影响,如图 1 所示。易知在三种围压条件下土体动弹性模量均随应变的增大而减小,同一应变下围压越大土体的动弹性模量越大。原因主要是初始阶段土体抵抗变形的能力主要由土骨架提供,其抵抗能力较强;随着动荷载的增大,土骨架中薄弱环节发生重排列与联结,大颗粒被压碎,土体抵抗变形的能力降低;当土体内部颗粒间的空

隙完全被土细小颗粒充填时,土体抵抗变形的能力趋于稳定。另一方面,围压相当于给土体提供了一个包裹力,较大围压有助于提高土体抵抗变形的能力。

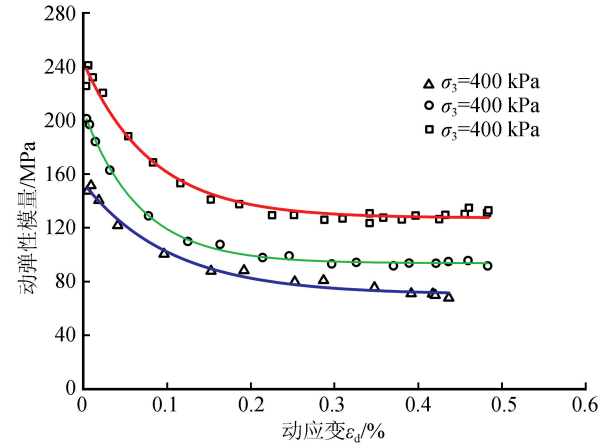


图 1 不同围压下加筋土的动弹性模量曲线
Fig.1 Dynamic elastic modulus curves of reinforced soil under different confining pressures

3.2 含水率对土体动弹性模量的影响

水是影响土体力学性质最重要的指标。以加筋层位为 4—4、筋材为硬窗纱、围压为 400 kPa(28 # $w=8.6\%$ 、39 # $w=11.9\%$ 、47 # $w=16\%$)下加筋土试验为例,分析了不同含水率下加筋土的动弹性模量规律,如图 2 所示。可以看出不同含水率下土体的动弹性模量呈衰减规律,相同应变下含水率越大,土体的动弹性模量越小。原因是在土体压缩过程中首先被压缩的是土骨架,土骨架是由土颗粒间自由排列和联结作用形成的,颗粒间存在颗粒与颗粒的咬合力和颗粒间有机钙质结核所形成的黏结力。这两种力对水较为敏感,水越多,颗粒间相当于

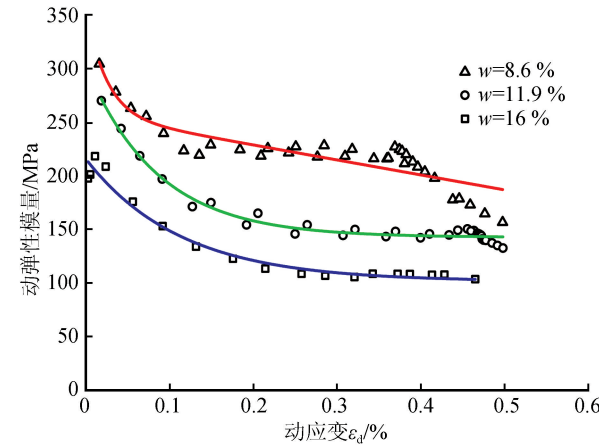


图 2 不同含水率下加筋土动弹性模量曲线
Fig.2 Dynamic elastic modulus curves of reinforced soil under different water content

充斥了一种润滑剂,咬合力降低,同时颗粒间的有机钙质结核被部分溶解,黏结力降低,直接导致土体抵抗变形的能力降低。当土体间的空隙完全被水和不可溶于水的有机质充填时,土体抵抗变形的能力趋于稳定,宏观表现为土体的动弹性模量平稳变化。

3.3 筋材对土体动弹性模量的影响

考虑到实际工程中常用不同的筋材作为路基建筑材料,本文选用硬窗纱、软窗纱、笼布作为筋材替代材料,进行了三种筋材(硬窗纱 39 #、软窗纱 41 # 和笼布 44 #)加筋作用下土体的动力特性试验,提取了不同筋材加筋后土体动弹性模量的发展演化规律,如图 3 所示。

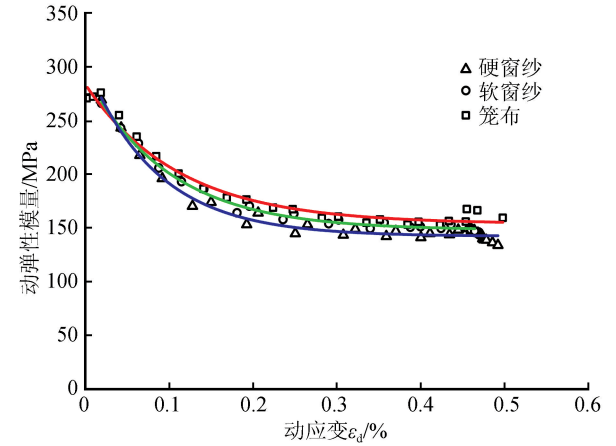


图 3 不同筋材作用下土体动弹性模量曲线
Fig.3 Dynamic elastic modulus curves of reinforced soil under different reinforced materials

可以看出,三种筋材作用下动弹性模量随应变的变化差异很小,但大致可以看出,初始阶段三者的差异较小,随着应变的逐渐发展,三者的差异逐渐明显,硬窗纱的动弹性模量最小,软窗纱次之,笼布最大。当应变发展到 0.5 % 时,三者的差异又逐渐减小。分析原因认为在初始阶段,由于所加筋材位于试样的中部,开始受力部分位于试样的上下端部,所以对外荷载的抵抗能力差异不大;随着变形的发展,外荷载施加的力逐渐传递到试样中部,试样中部的筋材开始协同受力,此时由于三种筋材的物理力学性质差异,对试样的整体力学性能表现出不同的状态,经拉力机测试,三种筋材单位面积的拉力值大小分别为硬窗纱 67 N、软窗纱 11 N 和笼布 26 N。由于笼布的拉力值与土体较为接近,同时笼布的韧性较好,能与土体协调变形,因此使用笼布加筋时效果较明显;硬窗纱由于其拉力值过大,自身硬度较大,荷载传递到土体中部时,主要由硬窗纱骨架承担荷

载作用,由于外荷载相比硬窗纱的强度值较大,因此很容易将硬窗纱直接压缩变形,在此过程中土体与硬窗纱的耦合程度不高,表现为初期主要由硬窗纱承受剪切力,大变形后土体颗粒嵌入硬窗纱网格中协调变形;软窗纱的协调变形能力居于硬窗纱和笼布之间,其拉力值较硬窗纱和笼布均小,所以在外荷载传递到试样中部时软窗纱作为骨架单独承受外力的时间较短,之后便同土颗粒一起形成骨架承担外力,故表现出动模量次之的特点。

3.4 加筋层数对土体动弹性模量影响

考虑到边界效应的影响,结合试样实际尺寸($\varphi 39.1\text{ cm} \times h 80\text{ cm}$),开展了加筋层数为 $N=0$ (34 #), $N=1$ (39 #) 和 $N=2$ (51 #) 的加筋土动三轴试验。分析了动弹性模量随动应变的演化规律,如图 4 所示。

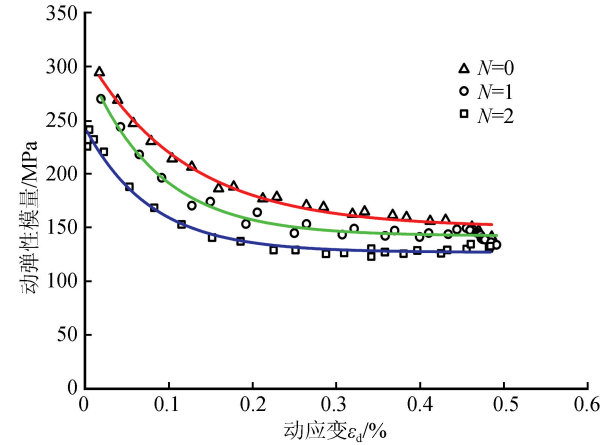


图 4 不同加筋层数下土的动弹性模量曲线

Fig.4 Dynamic elastic modulus curves of reinforced soil under different reinforced layers

可以明显看出,三种加筋方式下试样的动弹性模量差异较明显,表现为随着加筋层数的增多,试样的动弹性模量逐渐减小,当应变发展到接近 0.5% 时,试样的动弹性模量不再随加筋层数变化。原因是由于本次提取的是围压为 400 kPa 时硬窗纱加筋的动弹性模量曲线,加筋土筋材和土颗粒间存在一定空隙,当外荷载作用在试样上时,相比素土而言,加筋土空隙率相对较大。微观层面,在动荷载作用下土颗粒排列方式调整的空间较大;而在宏观层面,表现为土体的可压缩程度较高,其承受外荷载的能力较低,因此具有较低的动弹性模量。随着加筋层数的增加,筋材与土颗粒间的空隙成倍数增加,使得加筋土的动弹性模量进一步降低;随着应变的逐渐发展,筋材与土颗粒间的位置排列和联结作用不断

调整,在某一时刻其空间状态调整为类素土的组合方式,此时加筋土的动弹性模量将不再受筋材的影响,本次试验该时刻为应变发展到 0.5% 左右。

3.5 土体动弹性模量的预测模型

通过前面的分析可知,试样的动弹性模量受围压、含水率、筋材和加筋层数的影响,尝试将不同状态下试样的动弹性模量曲线绘制曲线簇,如图 5 所示。

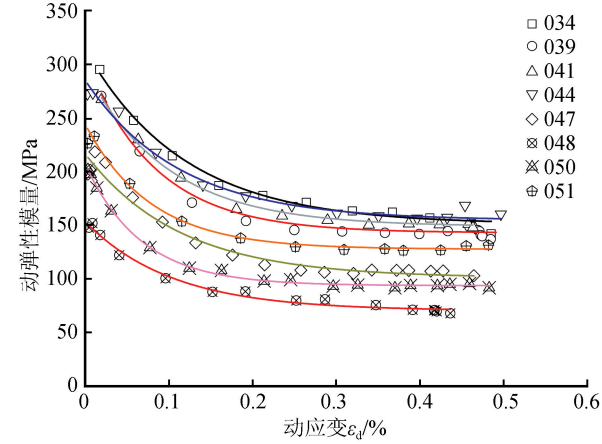


图 5 不同工况下动弹性模量曲线簇

Fig.5 Dynamic elastic modulus curve cluster under different working conditions

从图 5 可以看出,土体动弹性模量曲线具有较好的规律性,为探求其量化的预测模型,用动应变 ϵ_d 进行归一化处理,绘制 $\epsilon_d/E_d - \epsilon_d$ 曲线,如图 6 所示。

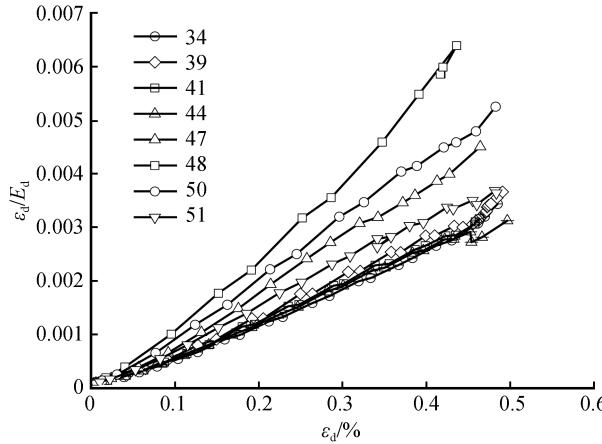


图 6 动弹性模量曲线归一化处理

Fig.6 Normalization of dynamic elastic modulus curve

不难发现,图 6 给出的动弹性模量归一化处理后的曲线规律性良好,均符合线性规律,因此根据线性公式可得如下表达式:

$$\epsilon_d/E_d = A + B \cdot \epsilon_d \tag{1}$$

通过公式推导,即可得到动弹性模量 E_d 的预测模型表达式:

$$E_d = \frac{\epsilon_d}{A + B \cdot \epsilon_d} \tag{2}$$

通过数据反演发现,式(2)在 $\epsilon_d = 0$ 时不成立,故对式(2)进行修正处理,提出了如式(3)所示的动弹性模量预测模型表达式:

$$E_d = C - \frac{\epsilon_d}{A + B \cdot \epsilon_d} \tag{3}$$

式中: E_d 为动弹性模量; ϵ_d 为动应变; A 、 B 、 C 均为试验参数。本次试验 A 、 B 、 C 的各取值如表 2 所示。通过分析可知,动弹性模量受筋材的影响较小,考虑到影响因素较多,分析时认为动弹性模量不受筋材种类的影响。

表 2 表达式相关模型参数

Table 2 Parameters of expression related model

编号	参数 A	参数 B	参数 C
28	0.000 8	0.006	320
39	0.000 3	0.006	290
47	0.000 5	0.006	240
34	0.000 6	0.005	310
51	0.000 4	0.006	260
41	0.000 6	0.006	280
44	0.000 8	0.005	290
48	0.000 9	0.009	160
50	0.000 3	0.008	210

分别提取了不同含水率、不同围压和不同加筋层数影响下的参数 A 、 B 、 C 取值,如表 3~表 5 所示。可以看出,参数 A 随含水率的增大先减小后增大,参数 B 保持不变,参数 C 线性减小;参数 A 随

表 3 不同含水率下模型参数

Table 3 Model parameters under different water contents

含水率/%	编号	A	B	C
8.60	28	0.0008	0.006	320
11.90	39	0.0003	0.006	290
16.00	47	0.0005	0.006	240

表 4 不同围压下模型参数

Table 4 Model parameters under different confining pressures

围压/kPa	编号	A	B	C
100	48	0.000 9	0.009	160
200	50	0.000 3	0.008	210
400	51	0.000 4	0.006	260

表 5 不同加筋层数下模型参数

Table 5 Model parameters under different reinforcement layers

加筋层数	编号	A	B	C
0	34	0.000 6	0.005	310
1	39	0.000 3	0.006	290
2	51	0.000 4	0.006	260

围压和加筋层数的规律与含水率类似,参数 B 随围压增大单调递减,随加筋层数增加基本不变,参数 C 随围压增大单调递增,随加筋层数增加单调递减。

4 结论

加筋土的动力学问题在公路工程中经常遇到。以往对于此类问题均按静力状态进行分析处理,与实际状态差异较大。本文通过加筋土的动三轴试验,得出了如下结论:

(1) 加筋土的动弹性模量受含水率、围压、加筋材料和加筋层数等多种因素影响,其影响的敏感性等级为含水率>围压>加筋层数>加筋材料。

(2) 从筋材与土颗粒相互作用机理出发,阐明了各影响因素对试样动弹性模量影响的内在原因。

(3) 对试验结果进行归一化处理,提出了不同因素影响下动弹性模量衰减的预测模型,给出了具体的表达式。

参考文献(References)

[1] 魏红卫,喻泽红,邹银生.土工合成材料加筋土抗剪作用的试验研究[J].水利学报,2005,36(5):555-562.
WEI Hongwei,YU Zehong,ZOU Yinsheng.Shear Characteristics of Soil Reinforced with Geosynthetic Material[J].Journal of Hydraulic Engineering,2005,36(5):555-562.

[2] 姚攀峰,祁生文,张明.基于路径的非饱和土抗剪强度指标确定方法[J].岩土力学,2009,30(9):2605-2608.
YAO Panfeng,QI Shengwen,ZHANG Ming.Simplified Method for Determining Shear Strength of Unsaturated Soils Based on Different Paths[J].Rock and Soil Mechanics,2009,30(9):2605-2608.

[3] 傅华,凌华,蔡正银.加筋土强度影响因素的试验研究[J].岩土力学,2008,29(增刊 1):481-484.
FU Hua,LING Hua,CAI Zhengyin.Experimental Study of Factors Affecting Strength of Reinforced Soil[J].Rock and Soil Mechanics,2008,29(Suppl):481-484.

[4] 张孟喜,闵兴.单层立体加筋砂土性状的三轴试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(8):931-936.
ZHANG Mengxi,MIN Xing.Triaxial Tests on Sand Reinforced with One-layer 3D Reinforcement[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(8):931-936.

[5] 龙玉民.重塑粘性土 c 、 φ 值影响因素研究[D].长沙:中南大学,2012.
LONG Yumin.Influence Factor Study of Remolded Cohesive Soil's c 、 φ Values[D].Changsha:Central South University,2012.

[6] 林鸿州,李广信,于玉贞,等.基质吸力对非饱和土抗剪强度的

影响[J].岩土力学,2007,28(9):1931-1936.

LIN Hongzhou, LI Guangxin, YU Yuzhen, et al. Influence of Matric Suction on Shear Strength Behavior of Unsaturated Soils[J].Rock and Soil Mechanics,2007,28(9):1931-1936.

[7] 丁万涛,雷胜友.含水率对加筋膨胀土强度的影响[J].岩土力学,2007,28(2):391-394.

DING Wantao, LEI Shengyou. Influence of Water Contents on Strength of Reinforced Expansive Soils[J].Rock and Soil Mechanics,2007,28(2):391-394.

[8] WANG Z J, LUO Y S, GUO H, et al. Effects of Initial Deviatoric Stress Ratios on Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Undisturbed Loess in China[J].Engineering Geology,2012,143-144:43-50.

[9] YANG C C, CAI W X, DOU H Y. Research on Comparison of the Maximum Dynamic Shear Modulus Test[J].Procedia Engineering,2012,28:230-234.

[10] SUN J, GONG M S, TAO X X. Dynamic Shear Modulus of Undisturbed Soil under Different Consolidation Ratios and Its Effects on Surface Ground Motion[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2013,12(4):561-568.

[11] 胡志平,王强,张雨禾,等.应力、应变控制下压实黄土动力特性研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1161-1167.

HU Zhiping, WANG Qiang, ZHANG Yuhe, et al. Dynamic Characteristics of Compacted Loess under Controlled-stress and Controlled-strain Modes[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(6):1161-1167.

[12] 马林,张军,刘亚明.车辆荷载作用下山西路基重塑黄土的动力特性研究[J].地震工程学报,2018,40(1):101-104.

MA Lin, ZHANG Jun, LIU Yaming. Study on the Dynamic Characteristics of Remolded Loess in Shanxi Expressway Subgrade under Vehicle Loads[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):101-104.

[13] 刘亚明,王家鼎,谷天峰,等.压实黄土动强度特性及其影响因素试验研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2016,52(6):735-740.

LIU Yaming, WANG Jiading, GU Tianfeng, et al. Experimental Research on the Dynamic Strength Characteristics of Compacted Loess and Its Impact Factor[J].Journal of Lanzhou University (Natural Science),2016,52(6):735-740.

[14] 刘亚明,王家鼎,谷天峰.循环荷载下压实黄土动力特性的试验研究[J].水文地质工程地质,2015,42(3):108-112,118.

LIU Yaming, WANG Jiading, GU Tianfeng. Dynamic Characteristics of Compacted Loess under Cyclic Loads[J].Hydrogeology & Engineering Geology,2015,42(3):108-112,118.

[15] 任非凡,何江洋.加筋土结构动力特性研究现状综述[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(4):120-129.

REN Feifan, HE Jiangyang. Research Status Review on Dynamic Properties of Reinforced Earth Structure[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2016,27(4):120-129.