

文章编号: 1001-4888(2014)01-0066-07

动荷载作用下高速铁路风积土 地基动力特性试验研究^{*}

张向东¹, 刘家顺¹, 王洪伟²

(1. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁有色勘查研究院, 辽宁沈阳 110013)

摘要: 根据辽西地区的地震资料和波速测试资料, 通过动三轴试验, 进行了地震冲击荷载和列车振动荷载两种动荷载作用下辽西风积土地基的动力特性试验研究。研究表明, 风积土的动强度、动变形和动模量等指标与荷载类型、持续时间、振动频率和动应力幅值等条件有关。在地震荷载作用下, 动荷载频率和动应力幅值越大、震动持续时间越长, 其产生的动应变越大; 在高速列车振动荷载作用下, 土的动强度和动抗剪强度随振动次数的增加而降低; 固结比相同时, 动弹性模量 E_d 和动剪切模量 G_d 随固结压力的增大而增大; 随动应变 ϵ_d 的增大而减小, 且初始时刻减小速度明显, 之后逐渐变缓。

关键词: 动三轴试验; 动力特性参数; 地基; 风积土; 地震荷载; 高速列车荷载

中图分类号: TU478

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-018

0 引言

研究表明, 风积土具有明显的结构性, 在高速列车振动荷载和地震荷载两种振(震)动荷载作用下, 内部结构很容易发生根本性的变化^[1], 造成路基沉降, 给交通行业带来巨大的经济损失。因此由动力荷载作用引起土的动力特性的改变, 以及由此引发的路基病害已成为高速铁路地基振(震)害的主要原因之一。随着中国高速铁路的建设不断加快, 如何考虑振(震)动荷载所引起的土动力特性的改变已经逐渐成为工程界普遍关注的问题。从 20 世纪 60 年代以来, 国内外的学者主要研究了动力荷载的作用机理, 王兰民^[2]、谢定义^[3,4]等以西北黄土为研究对象, 利用室内动三轴试验和现场观测方法系统地研究了土的动力特性, 特别对地震荷载作用下黄土的震陷做了深入的研究, 对黄土地基的震陷量做出了正确的预测与分析。梁波^[5]、唐益群^[6,7]研究了列车行车荷载对土的动力特性的影响。但将地震荷载作用和列车振动荷载作用对比研究较少, 尤其对风积土在上述两种荷载作用下的研究结果进行对比研究的还很少。

秦沈客运专线全线处于风积土广泛分布的地区, 本文通过对路基周边地震资料的分析和现场剪切波测试结果, 根据三角级数法合成了人工地震波, 并根据 Seed 等人的研究方法将其等效为等幅正弦波^[8]。通过室内动三轴试验, 获得了地震荷载和高速列车荷载作用下高铁地基风积土的动强度、动模量等参数, 并将两种(震)振动荷载作用下的试验结果进行比较, 得出了地震荷载和高速列车振动荷载作用下风积土的动力特性。为辽西地区风积土地基抗震设计提供了依据, 对防止和减少因动荷载作用而引

^{*} 收稿日期: 2013-02-17; 修订日期: 2013-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(No:50978131)、高等学校博士学科点专项科研基金(No:20112121110004)和辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(No:2008RC23)资助

通讯作者: 刘家顺(1986—), 男, 博士。E-mail:liujiashun000@163.com

起的地基破坏具有参考价值。

1 试验概述

1.1 试验仪器

本试验仪器为 DDS-70 微机控制电磁式振动三轴仪,该试验系统具有自动控制功能、数据自动采集和处理功能。试验所用试样尺寸:直径 39.1mm,高 80mm;轴向最大动出力:1370N;侧向压力:0~0.6MPa;反压:0~0.3MPa;频率范围:1~10Hz;最大允许轴向位移:20 mm。

1.2 试验土样

本文试验所用土样取自阜新市人民大街北约 1.5km 处的高铁路基附近,取土深度约为 2~2.5m。其物理、力学性质如表 1 所示。

表 1 阜新地区风积土的物理、力学性质

Tab. 1 Physico-mechanical properties of undisturbed aeolian soil in Fuxin area

土样 编号	取土深度 $h(\text{m})$	密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	干密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	天然含 水量 $\omega(\%)$	液限 I_L	塑限 I_w	塑性 指数 I_P	孔隙比 e
1	1.5	1.87	1.60	16.8	29.5	17.9	11.6	0.623
2	2.0	1.95	1.63	20.1	29.8	18.1	11.7	0.618
3	2.5	2.01	1.65	21.8	30.1	18.2	11.9	0.596

1.3 试验步骤

1.3.1 制作土样

将取回的土样用切土刀切成稍大于标准尺寸的切样。然后用钢丝锯修理成尺寸为 39.1~80mm 的圆柱体。

1.3.2 安装试样

按照文献[9]中关于三轴试验试样安装的步骤安装试样。

1.3.3 试样加压

对土样逐级施加 50kPa、100kPa、150kPa 的围压 σ_c 进行固结。根据地震荷载和高速列车行驶时路基土的受力特点及动应力大小,激振波采用正弦波,激振频率 f 分别为 1Hz 和 5Hz,取固结比 $K_c=1$ 。

1.3.4 试样加载

待试样固结稳定后施加动荷载,控制指标如表 2 所示。

表 2 控制指标

Tab. 2 Controls parameter

控制标准	加载波形	频率 $f(\text{Hz})$	应力幅值(kPa)	振次 $N(\text{次})$
应力控制	正弦波	1, 5	20, 40, 60	5, 10, 100, 500, 1000

2 试验结果分析

土的动强度是指土在一定动荷载循环作用下产生破坏应变所需要的动应力^[10]。本文试验均为等压固结(即 $K_c=1$),破坏标准采用双幅应变的 5%。通常,为达到此应变,可以采用较大的动应力 σ_d 值和较少的循环作用次数 N (如地震荷载),也可以采用较小的动应力 σ_d 值和较多的循环作用次数 N (如列车振动荷载)。

2.1 地震荷载作用下的试验结果

2.1.1 确定地震剪应力

地震荷载是随机动荷载^[11],其振幅和频率均随机变化,根据阜新市地震局提供的资料,辽西地区地震的频率为 1~5Hz,最大地震加速度约为 92gal。H. B. Seed 等人^[8]根据对一系列强震记录的分析,并

结合室内试验数据,建议取平均等效剪应力 τ_{av} 约为最大剪应力 τ_{max} 的 65%。 τ_{max} 可用式(1)计算:

$$\tau_{max} = \frac{\gamma h}{g} a_{max} \cdot C_\varphi \quad (1)$$

于是

$$\tau_{av} = 0.65 \tau_{max} \cdot C_\varphi \quad (2)$$

式中, τ_{max} 为深度 h 的单位面积上的土柱体在地面运动最大加速度时的最大剪应力; γ 为土的重度; a_{max} 为地面运动最大加速度; g 为重力加速度; C_φ 为折减系数, $C_\varphi < 1$ 。

根据表 1 中该地区土的重度等条件,取 $C_\varphi = 0.98$, 计算不同深度处路基土体的最大剪应力 τ_{max} 和平均等效剪应力 τ_{av} 的值,其计算结果见表 3。

表 3 地震荷载作用下不同深度处路基土最大应力值

Tab. 3 The τ_{max} of different depth under earthquake loads

路基深度 $H(m)$	容重 $\gamma(kN/m^3)$	最大剪应力 $\tau_{max}(kPa)$	平均等效剪应力 $\tau_{av}(kPa)$
5	18.7	8.60	5.48
10	19.5	11.97	7.62
15	20.1	15.40	9.81

谢定义等对震害的研究^[12-14]表明:震级、震中距离、震动持时、频率特性和土的物性条件是影响震陷的主要因素。地震加速度越大、持续时间越长、频率越低,对土体的破坏作用越强。反之,地震加速度越小、持续时间越短、频率越高,对土体的破坏作用越弱。

2.1.2 试验结果

1) 动抗剪强度

图 1 为不同频率和围压条件下风积土的动剪强度曲线。

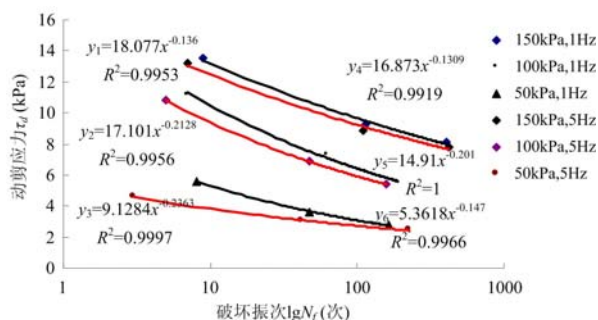


图 1 不同频率、围压的动抗剪强度曲线

Fig. 1 The curves of τ_d and $\lg N_f$ of different frequency and confining

可得不同围压下土体的动抗剪强度,如表 4 所示。

表 4 土体动抗剪强度

Tab. 4 Dynamic shear stress of soil under different confining pressures

围压 σ_c	$f=1\text{Hz}$				$f=5\text{Hz}$			
	系数 A	系数 B	R^2	$\tau_d(kPa)$	系数 A	系数 B	R^2	$\tau_d(kPa)$
50	9.128	0.236	0.9997	6.24	5.362	0.147	0.9966	4.23
100	17.101	0.213	0.9956	12.14	14.910	0.201	1.0000	10.79
150	18.077	0.136	0.9953	14.52	16.873	0.131	0.9919	13.67

通过比较表 3 和表 4 可以发现,即使在 4.5 级这样较小的地震荷载作用下,辽西地区的风积土也可能发生液化,特别是在较大的频率下,土体抗剪强度明显小于地震剪应力,从而导致土体强度丧失,基础

发生较大沉降变形。因此在高速铁路风积土路基的建设中,必须要考虑由于地震荷载作用,使得风积土路基出现动剪切破坏而造成的危害。

2) 动变形

图 2 和图 3 结果表明,应力幅值和振动次数是影响地震荷载作用下土动变形特性的主要因素。相同的固结比和固结围压条件下,随着震动次数的增多,动应力幅值越大,轴向累积应变越大。本试验结果说明,辽西地区风积土在动应力幅值 $\sigma_{d\max} < 20\text{kPa}$ 时,土体的动变形较小,不会出现破坏。但当动应力幅值 $\sigma_{d\max} > 40\text{kPa}$ 时,在振动 20 次以上,土体就会产生较大的变形,当振动次数大于 100 次,土体即产生破坏,从而引起地基震陷变形,影响线路平稳。

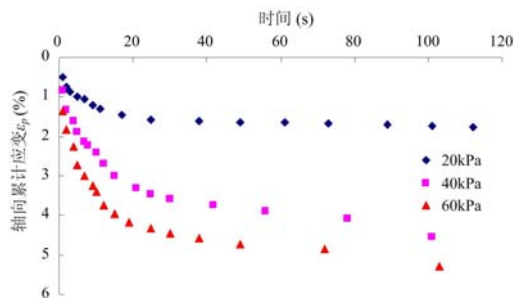


图 2 不同动应力幅值的轴向应变与时间关系曲线

Fig. 2 Dynamic stress and time curve under different stress amplitude

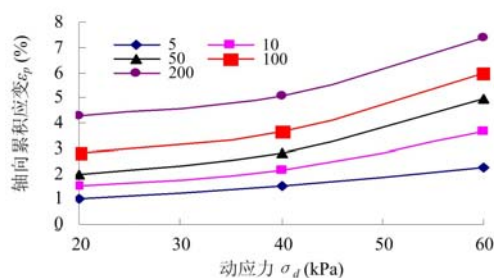


图 3 不同振次下动应力与轴向累积应变

Fig. 3 Dynamic stress and axial strain curve under different vibration times

2.2 列车荷载作用的试验结果

2.2.1 试验中列车荷载的选择

经实测,秦沈客运专线 DK223+240~DK235+110 里程段高铁列车对路基 1.0m 和 2.5m 深处的作用应力分别为 80kPa 和 30kPa。因高速列车振动荷载近似具有正弦波特征^[15],所以采用正弦波形来模拟高速列车振动荷载。在动三轴试验中,其振幅分别取 30kPa、50kPa 和 80kPa。车流量统计结果表明,高速列车作用频率集中在 1~5Hz 之间,本试验为模拟时速达 300km/h 的高速列车,结合试验设备,选取振动频率为 5Hz。图 4 为不同围压条件下的动剪切强度曲线。

2.2.2 试验结果分析

1) 土体动强度特性

土的动强度可以表示为达到某种破坏标准时振次 N_f 与作用动应力 σ_d 的关系,即 $\sigma_d - \lg N_f$ 曲线,称为土的动强度曲线^[4]。在本试验中指定固结比 $K_c = 1$,频率为 5Hz,土样破坏标准取轴向应变的 5%,具体数据见表 5。根据表 5 的数据,按照公式 $\tau_d = c_d + \sigma_d \tan \varphi_d$,可以得到列车循环荷载作用风积土动强度指标。

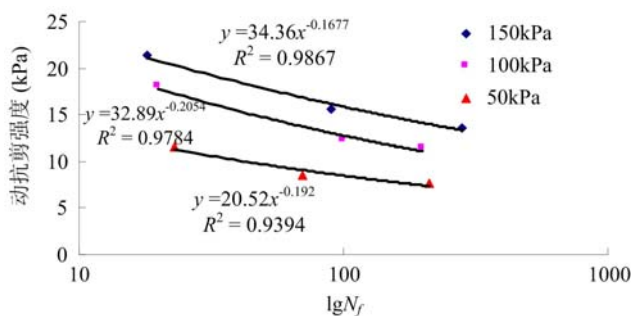


图 4 τ_d 与 $\lg N_f$ 的关系曲线

Fig. 4 The relation curve of τ_d and $\lg N_f$

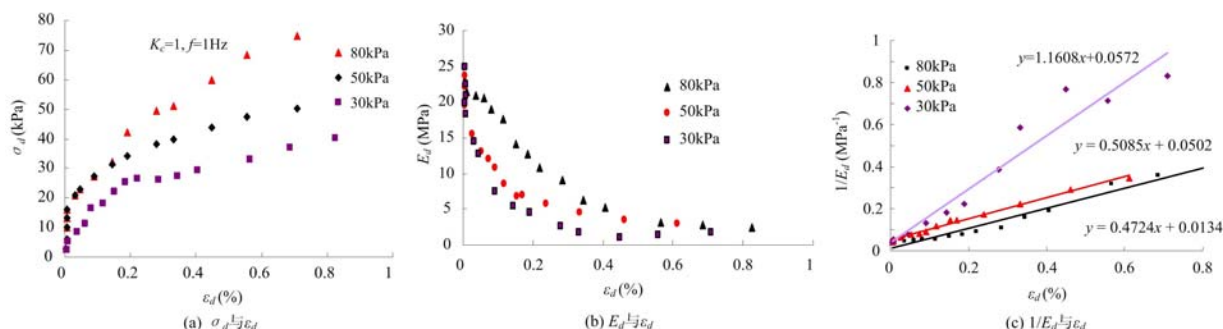
根据室内直接剪切试验结果,辽西风积土的粘聚力 $c = 8.48\text{kPa}$, $\varphi = 24.6^\circ$ 。试验结果表明,在列车循环荷载作用下,路基土的动强度远低于静载作用下的动强度,且粘聚力的降低速度较快,内摩擦角的变化不是很明显。土的动强度和动抗剪强度随振动次数的增加而降低,且随着循环次数的增加动强度和动抗剪强度降低的速度逐渐减小。因此在设计高速铁路路基时所取的动强度指标,应根据列车行驶的动荷载与作用次数而定。根据顾琦等^[16]的研究成果,风积土的动强度随着指定的破坏应变值的增大而增大。因此,在高速铁路设计中,必须根据具体的要求和实际的情况,合理地定出应变破坏值,以减小列车动荷载对高铁路基土动强度和变形的影响,保证高铁运行安全。

表 5 $f=5\text{Hz}$, $\epsilon_d=5\%$ 时各振次下的动强度指标Tab. 5 $f=5\text{Hz}$, $\epsilon_d=5\%$ dynamic strength index

振动次数 N	总应力 σ_1 (kPa)	固结围压 σ_3 (kPa)	动荷载 σ_d (kPa)	动内聚力 c_d (kPa)	动内摩擦角 φ (°)
10	58	30	28	5.36	17.5
	116	60	46		
	155	80	75		
100	56	30	26	2.51	16.2
	104	60	44		
	141	80	61		
1000	52	30	22	1.13	16.0
	108	60	48		
	132	80	62		

2) 土体动模量特性

通过动弹模试验,可以得到不同固结围压时风积土的动应力—动应变($\sigma_d-\epsilon_d$)、动弹性模量—动应变($E_d-\epsilon_d$)关系曲线。如图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)所示。

图 5 风积土动应力 σ_d 、 E_d 、 $1/E_d$ 与 ϵ_d 关系曲线Fig. 5 Dynamic stress σ_d , E_d , $1/E_d$ and strain ϵ_d relation curve

由图 5(c)可以看出, ϵ_d 与 $1/E_d$ 具有一阶线性关系。设

$$1/E_{di} = a_i \epsilon_d + b_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

而 $\sigma_d = E_d \epsilon_d$, 所以有:

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{a_i + b_i \epsilon_d} \quad (5)$$

式中, E_d 为土体的动弹性模量, MPa; ϵ_d 为动应变, %; σ_d 为动应力, kPa; a 和 b 为拟合系数; i 分别代表动应力幅值 30kPa、50kPa 和 80kPa 时上述各变量的值。

根据式(4)可以得到不同围压下, 风积土试样的最大弹性模量 $E_{\max}$, 同时根据动剪切模量 $G_{\max} = E_{\max}/2(1+\mu)$ 和动剪应变 $\gamma_d = \epsilon_d(1+\mu)$ 可得出其最大剪切模量和以及 γ_d-1/G_d 曲线和 $\tau_d-\gamma_d$ 曲线, μ 为该土样的泊松比, 取为 0.35。拟合结果及相关系数如表 6。

试验结果表明, 在高速列车振动荷载长时作用下所取土样的动弹性模量 E_d 和动剪切模量 G_d 随固结压力的不同和动应变的变化而异。在相同固结比条件下, E_d 和 G_d 随固结压力的增大而增大; 随 ϵ_d 的增大而减小, 且应变较小时变化明显, 应变较大时变化变缓。特别是在初始加荷阶段, 应变较小, 但是动弹性模量和动剪切模量变化较大。因此在高铁列车循环作用下, 路基土体迅速变形, 随着应变的增加, 动剪切模量的变化逐渐趋于缓和, 也就是说列车振动荷载作用一段时间以后, 土体的变形将不再像加载初始阶段那样明显, 而是以蠕变为主。

表 6 参数表及 $E_{\max}$ 和 $G_{\max}$
Tab. 6 Parameters, $E_{\max}$ and $G_{\max}$

	30kPa	50kPa	80kPa
a	0.121	0.1274	0.194
b	0.001	0.0124	0.0122
相关系数	0.9683	0.9872	0.9937
$E_{\max}$ (MPa)	8.26	7.85	5.15
$G_{\max}$ (MPa)	3.06	2.91	1.91

3 结论

(1) 本文分别研究了在地震荷载与列车荷载作用下风积土的动强度指标。试验结果表明,振动频率、动应力幅值、振动次数和作用时间是影响风积土动强度的主要因素。

(2) 地震荷载作用时,风积土的动力特性与频率、持时和施加动应力大小等因素有关。频率越小,作用持续时间越长,施加的动应力幅值越大产生的轴向累计变形越大,反之则变形越小。

(3) 列车荷载作用时,风积土动强度随振动次数的增加而减小,且动荷作用初期,强度降低较快;风积土的动强度随着指定的破坏应变值的增大而增大;随着应变的增加,风积土的动弹性模量和动剪切模量不断减小;特别是在应变的初始阶段,动弹性模量和动剪切模量变化较大,随着应变的增大这种趋势逐渐减弱。

(4) 地震荷载和列车荷载对土的动强度和动力特性的影响是不相同的。地震荷载持续时间较短,振幅逐渐衰减,频率具有随机性,因而地震荷载产生的动变形增加的趋势是非平稳的。而列车荷载持续时间较长,振幅和频率具有一定的周期性,因而列车振动荷载产生的动应变增加趋势较为平稳。

参考文献:

[1] 张向东,刘功勋,于崇 等. 辽西地区风积土结构特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3):691—695(ZHANG Xiangdong, LIU Gongxun, YU Chong, et al. Testing study on structural character of aeolian soil in western area of Liaoning Province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3):691—695(in Chinese))

[2] 王兰民 等著. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社, 2003(Wang Lanmin, et al. Loess Dynamics [M]. Beijing: Seismological Press, 2003(in Chinese))

[3] 刘保健,谢定义. 随机荷载下土动力特性测试分析法[M]. 北京:人民交通出版社, 2000(LIU Baojian, XIE Dingyi. Soil Dynamic Test Analysis under Random Load [M]. Beijing: Renmin Communication Press, 2000(in Chinese))

[4] 谢定义 著. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1988(Xie Dingyi. Soil Dynamics[M]. Xi'an: Publishing House of Xi'an Jiaotong University, 1988(in Chinese))

[5] 梁波,罗红,孙常新. 高速铁路振动荷载的模拟研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(4):89—94(LIANG Bo, LUO Hong, SUN Chang-xin. Simulated Study on Vibration Load of High Speed Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(4):89—94(in Chinese))

[6] 唐益群,王艳玲,黄雨 等. 地铁行车荷载下土体动强度和动应力—应变关系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6):701—703(TANG Yiqun, WANG Yanling, HUANG Yu, et al. Dynamic Strength and Dynamic Stress-strain Relation of Silt Soil under Traffic Loading[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(6):701—703(in Chinese))

[7] 唐益群,张曦,叶为民 等. 地铁列车振动荷载作用下土体的动力特性和动强度研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(suppl.):98—101(TANG Yiqun, ZHANG Xi, YE Weimin, et al. A Study on Dynamic Strength and Dynamic Stress-strain Relation of Silt Soil under Traffic Loading [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(suppl.): 98—101(in Chinese))

[8] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential [J]. Soil Mech. Found Div,

- ASCE, 1971, 97(SM9):1249—1273.
- [9] TB 10102—2004. 铁路工程土工试验规程[S]. 中华人民共和国行业标准, 2004(TB 10102—2004. Test Methods of Soils For Railway Engineering[S]. Industry Standard of the People's Republic of China, 2004(in Chinese))
- [10] 张勇, 孔令伟, 郭爱国 等. 循环荷载下饱和软粘土的累积塑性应变试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6):1542—1548(ZHANG Yong, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6):1542—1548(in Chinese))
- [11] 王峻, 王兰民. 地震荷载作用下黄土地基震陷研究[J]. 世界地震工程, 2007, 23(4):44—47 (WANG Jun, WANG Lanmin. Study on seismic subsidence of loess ground under simulated earthquake loads[J]. World Earthquake Engineer Ing, 2007, 23(4):44—47(in Chinese))
- [12] 王峻, 刘旭. 白兰高速公路沿线黄土场地震陷区判别与评价[J]. 水文地质工程, 2004(3):13—16 (WANG Jun, LIU Xu. Discrimination and evaluation for seismic subsidence areas in loess sites along the highway from Baiyin to Lanzhou[J]. Hydrology and Engineering Geology, 2004(3):13—16(in Chinese))
- [13] 宋章, 程谦恭, 张炜. 黄土的动强度特性试验分析[J]. 路基工程, 2009, 6(147):65—66 (SONG Zhang, CHENG Qiangong, ZHANG Wei. Test analysis of dynamic strength characteristics of loess soil[J]. Sub-grade Engineering, 2009, 6(147):65—66(in Chinese))
- [14] 谷天峰. 郑西客运专线黄土地基振(震)陷研究[D]. 西北大学博士学位论文, 2007 (GU Tianfeng. Study on Loess Seismic Subsidence and Dynamic Settlement Roadbed of Zhengzhou-Xi'an Passenger Express Railway[D]. Xi'an; Doctor degree thesis of Northwest University, 2007(in Chinese))
- [15] 胡照艳, 齐静, 高峰. 高速铁路列车振动荷载的分析[J]. 四川建筑, 2007, 28(1):65—66 (HU Zhaoyan, QI Jing, GAO Feng. Analysis on vibration load of High-speed railway[J]. Sichuan Architecture, 2007, 28(1):65—66(in Chinese))
- [16] 顾琦, 曾阳生, 何玉佩. 特定循环荷载下砂、粘性土的性状[C]. 全国土工建筑地基抗震学术讨论会(西安), 1986:196—202(GU Qi, ZENG Yangsheng, He Yupei. Characters of sand and cohesive soil under specific cycle load [C]. The national geotechnical construction of foundation seismic scientific conference (Xi'an), 1986:196—202(in Chinese))

Experimental Study of Dynamic Characteristics of Aeolian Soil Subgrade Subjected to High-Speed Train Dynamic Loading

ZHANG Xiangdong¹, LIU Jia-shun¹, WANG Hong-wei²

(1. Institute of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

2. Liaoning Institute Nonferrous Investigation, Shenyang, Liaoning 110013, China)

Abstract: Based on seismic data around Liaoning Province west region and wave velocity test data, through dynamic triaxial test, experimental study of dynamic characteristics of aeolian soil subgrade in west Liaoning Province subjected to both earthquake loading and high-speed train vibration loading was carried out. Results show that the dynamic strength, dynamic deformation, dynamic modulus and other indexes of aeolian soil are related to the load type, duration, frequency, dynamic stress amplitude and other conditions. Under earthquake loading, when specimens are subjected the same dynamic stress, the higher frequency is corresponding with the larger dynamic stress amplitude, the longer duration and larger dynamic deformation. When specimens are subjected to the vibration load of high-speed train, the dynamic strength and dynamic shear strength reduce along with the increase of vibration frequency. Under the same consolidation ratio condition, dynamic elastic modulus (E_d) and dynamic shear modulus (G_d) increase with the increase of consolidation pressure, but decrease with the ϵ_d increase, and reduce significantly at the initial time, then gradually slow down.

Keywords: dynamic triaxial experiment; dynamic characteristic parameters; subgrade; aeolian soil; earthquake load; high-speed train load