

基于动三轴试验的压实黄土动强度特性研究^①

王军海¹, 刘亚明²

(1.山西省勘察设计院, 山西 太原 030013; 2.西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:选取吕梁地区黄土,通过静压压实制备三轴试样,在GDS振动三轴仪上研究含水率、干密度和加载频率对压实黄土动强度的影响规律。结果表明:压实黄土的动强度及动强度参数均随振次的增加而减小,随含水率的增大而减小,随干密度和加载频率的增大而增大,动强度与振次之间的关系可用对数方程进行拟合。研究对黄土地区填方区基础设施建设具有重要意义。

关键词: 地区吕梁; 动三轴; 压实黄土; 动强度

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)03-0439-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.03.0439

Dynamic Strength Properties of Compacted Loess Based on Dynamic Triaxial Test

WANG Jun-hai¹, LIU Ya-ming²

(1. Shanxi Investigation Research and Design Institute, Taiyuan 030013, Shanxi, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: With ongoing western development, new urban construction in high-fill areas is a growing trend. Therefore, conducting research on the dynamic strength properties of compacted loess has important significance for the construction of large-scale infrastructure in loess areas of high seismic intensity. In this paper, with Lvliang compacted loess as the research object, we prepared triaxial specimens by static compaction. During the dynamic triaxial tests, we used stress control loading to apply dynamic load to the specimens. After sample loading, first, we applied a predetermined confining pressure to the specimen. Second, we applied a bias voltage to it. After consolidation was complete, dynamic stress was applied to the sample. When the specimen became damaged, we stopped loading. We preset the number of dynamic stress vibration times as 200. We performed many dynamic triaxial tests using dynamic triaxial apparatus to study the dynamic strength properties of Lvliang compacted loess including moisture content, dry density, and loading frequency. The results indicate that the dynamic strength of compacted loess decreases with an increased number of vibration times, and this relationship can be fitted to a logarithmic equation. The dynamic strength parameters of compacted loess decrease with an increase in moisture content and increase with increases in dry density and loading frequency. The dynamic cohesive force and dynamic internal friction angle decrease with an increase in the number of vibration times and then finally tend to stabilize.

Key words: Lvliang area; dynamic triaxial; compacted loess; dynamic strength

① 收稿日期: 2015-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(41372269)

作者简介: 王军海(1970—),男,河南林州人,高级工程师,从事岩土工程勘察与设计的生产与科研工作。E-mail: wjh4036@126.com。

0 引言

黄土分布在我国地震多发且烈度较高的中西部地区,其干旱、半干旱的地域特征以及黄土自身的大孔隙架空结构和对水的特殊敏感性均决定了黄土动、静力学特性研究在黄土地区工程实践中的重要地位^[1]。王志杰^[2-4]、王家鼎^[5]、谷天峰^[6]、郭乐^[7]、王念秦^[8]、王峻^[9]、张希栋^[10]、Sun Jing^[11]、Yang Chuancheng^[12]等学者在黄土的动力学性质研究方面都取得了丰硕的成果。

随着黄土地区城市用地紧张的矛盾日益突出,在高填方地区进行基础建设成为了新趋势。因此进行压实黄土的动力稳定性研究对黄土地区的抗震减灾具有重要意义。刘保健等^[13]通过动三轴试验分析了压实黄土的应力松弛随湿度、围压、激振频率和初始应变变化的关系;李焱等^[14]利用动扭剪三轴仪得出压实黄土动强度及其参数均随振动频率的增大而增大;杨利国等^[15-17]利用改进后的 DTC-199 型周期扭转荷载三轴仪研究了初始应力条件对压实黄土动力学性质的影响;李又云等^[18]在大量动三轴试验的基础上研究了干密度、含水率及围压对压实黄土的动弹性模量、阻尼比影响。由于目前对压实黄土的动强度特性研究较少,且不够系统全面,造成对压实黄土的动强度特性认识不足。

本文选取吕梁压实黄土为研究对象,在 GDS 振动三轴仪上进行动三轴试验,研究含水率、干密度和加载频率等因素对压实黄土动强度特性的影响。

1 试验概述

1.1 试验仪器与试样制备

试验所用仪器为英国 GDS 振动三轴仪。该仪器主要由三轴压力室、轴向及侧向加压系统、反压压力体积控制器、数据采集器和计算机组成,可以精确完成动态应力下小应变三轴试验。

试验所用土样为吕梁第四系上更新统的马兰黄土。该黄土呈浅黄色,具大孔隙,结构疏松,垂直节理发育,含少量钙质结核,湿陷性较强。其基本物理指标见表 1。

表 1 黄土物理性质指标
Table 1 Physical properties of loess

土粒比重 G_s	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	液性指数 I_L
2.69	17.1	24.9	7.8	-1.24

采用静压压实的方法制得三轴试样。制样过程

如下:首先将土碾碎,烘干,过 0.5 mm 细筛;然后按照预定的含水率进行配水,搅拌均匀后将土样密封放置;待其充分浸润后,取一定质量的黄土装入磨具中,将其放置于千斤顶上,通过静压将土体均匀压实,然后脱模,将制备好的试样风干到预定含水率,放入干燥器中养护。

1.2 试验方案

本次压实黄土的动力学试验采用应力控制加载方式,对试样施加动荷载。试验固结比选取 1.69。

试验控制含水率分别为 6%、10%、12%、14% 和 18%,控制干密度分别为 1.6 g/cm³、1.7 g/cm³ 和 1.8 g/cm³,控制加载频率分别为 0.1 Hz、0.5 Hz、1 Hz、5 Hz 和 10 Hz。试验过程中围压选取 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa。

1.3 破坏标准

土的动强度通常被定义为在一定次数动荷载作用下产生某一指定破坏应变所需要的动应力^[19]。王兰民^[1]研究发现对黄土来说,这一指定应变分别取为屈服应变和 3% 较为合理;当动应力-动残余应变曲线上屈服点很明显时,试样破坏应变取屈服应变;当动应力-动残余应变曲线上屈服点不太明显时,取 3% 作为破坏应变。

在压实黄土动强度试验过程中发现:由于黄土经过重塑后压实,其结构和含水率与原状黄土差异很大,屈服点不明显时使用应变 3% 的破坏标准与压实黄土的实际破坏情况不符。根据试样破坏的实际情况,在试验过程中,当有明显屈服点时取屈服点;没有明显的屈服点时,取累积残余应变 5% 为破坏标准。

2 试验结果

2.1 各因素对动强度的影响

由图 1 可以看出,压实黄土的动强度随振次的增加而减小。如图 1(a)所示,振次相同时动强度随含水率的增大而减小。这是因为黄土对水的作用非常敏感,含水率的增大降低了土粒之间的摩阻力,黏土颗粒表面的结合水膜增厚,导致原始黏聚力减小,此外,黏粒遇水导致其胶结性弱化,削弱了黄土的结构连接强度。

如图 1(b)所示,在振次相同的情况下动强度随干密度的增大而增大。干密度较小时,土体结构松散,土颗粒间联接力较小;随着干密度的增大,单位体积内的土颗粒明显增多,土颗粒间联接力增大,滑移困难,导致土体动强度增大。

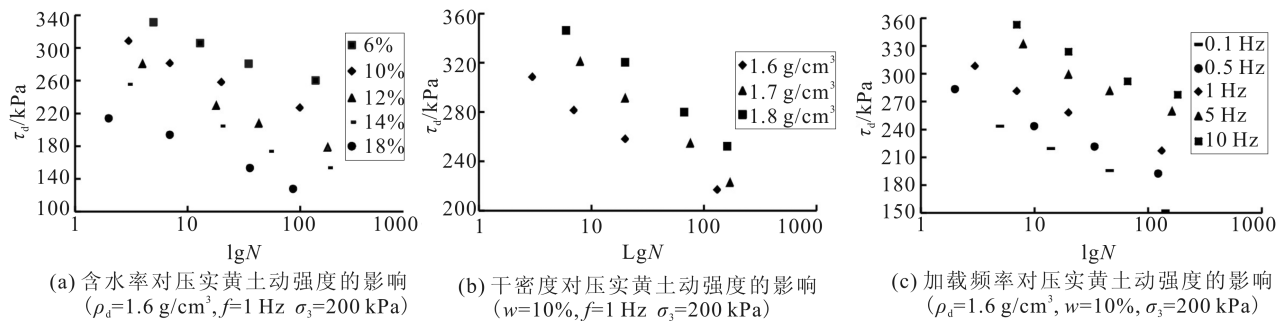


图 1 不同因素对压实黄土动强度的影响

Fig.1 The dynamic strength of compacted loess under different affecting factors

如图 1(c)所示,相同振次下动强度随加载频率的增大而增大。这是因为在高频时,每个振次中应力加载在土体上的时间较短,土体来不及在该级动应力下发生完全变形,即土颗粒滑移进行重新排列的时间不充分,造成土的抗剪强度增大;反之,低频时土体变形充分。剪力一定时,低频荷载下土体达到破坏所需的循环荷载相对更少,表现为土体抗剪强度的减小。

2.2 动强度随振次变化规律

由图 1 可知,动强度 σ_{df} 随 $\lg N$ 的增大大致呈线性下降。为了对压实黄土动强度与振次的关系有更加直观的认识,用式(1)对所有实验数据进行拟合,拟合结果见表 2。

$$\sigma_{df} = a \lg N + b \tag{1}$$

式中: σ_{df} 为为动强度(Pa); N 为振次; a 、 b 均为公式拟合常数。

表 2 σ_{df} 与 N 公式系数

Table 2 Coefficient of formula between σ_{df} and N

含水率/ %	围压/ kPa	a	b	相关 系数	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	围压/ kPa	a	b	相关 系数	频率/ /Hz	围压/ kPa	a	b	相关 系数
6	100	-35.2	381.7	0.992 6	1.6	100	-23.1	302.4	0.993 4	0.1	100	-45.0	313.0	0.911 7
	200	-21.6	362.6	0.979 9		200	-23.7	330.7	0.993 1		200	-26.4	288.7	0.977 8
	300	-24.0	407.4	0.964 0		300	-26.6	388.3	0.941 2		300	-42.2	400.3	0.995 4
10	100	-23.1	302.4	0.993 4	1.7	100	-17.7	308.0	0.967 1	0.5	100	-42.7	333.5	0.899 1
	200	-23.7	330.7	0.993 1		200	-31.6	387.1	0.994 9		200	-21.8	296.7	0.996 4
	300	-26.6	388.3	0.941 2		300	-43.3	488.0	0.902 9		300	-37.3	409.5	0.990 7
12	100	-27.4	297.6	0.944 8	1.8	100	-25.7	361.5	0.945 9	1	100	-23.1	302.4	0.993 4
	200	-26.9	312.7	0.983 1		200	-29.0	401.5	0.990 9		200	-23.7	330.7	0.993 1
	300	-33.4	380.6	0.972 1		300	-26.5	460.9	0.949 4		300	-26.6	388.3	0.941 2
14	100	-31.4	271.1	0.982 4	-	-	-	-	-	5	100	-23.4	326.5	0.842 0
	200	-25.5	281.3	0.989 7		-	-	-	-		200	-23.6	375.4	0.967 3
	300	-25.4	326.5	0.984 9		-	-	-	-		300	-31.6	440.7	0.961 1
18	100	-23.0	220.3	0.924 9	-	-	-	-	-	10	100	-21.1	332.7	0.910 8
	200	-23.1	233.5	0.988 5		-	-	-	-		200	-23.6	396.0	0.982 5
	300	-37.2	344.6	0.928 2		-	-	-	-		300	-28.0	440.6	0.979 4

由表 2 可以看出,对动强度 σ_{df} 与振次 N 的关系进行拟合后,拟合所得公式的相关系数基本上均在 0.9 以上。这表明动强度 σ_{df} 与振次 N 相关性明显,可用对数方程进行拟合,常数 a 、 b 仅随着土体的条件不同而取值不同。

因此,根据上述拟合所得公式可以较为准确地确定不同条件下的压实黄土在各振次下破坏所需的动应力。

2.3 各因素对动强度参数的影响

根据上述拟合所得公式,分别求取振次为 5、10、20、40、60、80、100、120、140 和 160 次时,压实黄土在 100、200 和 300 kPa 围压下破坏所需动应力,再根据文献[8]的方法求得其动强度参数,绘制 c_d - N 、 φ_d - N 散点图。

由图 2 可以看出,在相同振次下压实黄土的动黏聚力 c_d 和动内摩擦角 φ_d 均随土体含水率的增大而降低。这表明随着含水率的增大,压实黄土的颗

粒胶结明显减弱,在动应力作用下结构强度受含水率的影响迅速降低, c_d 和 φ_d 均显著降低。

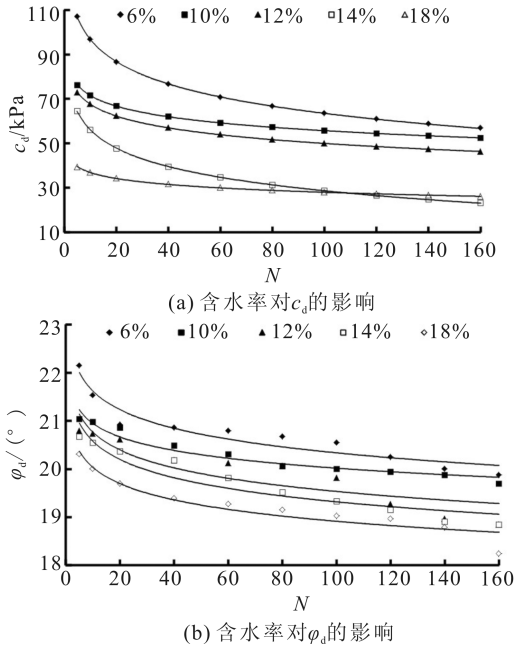


图 2 含水率对压实黄土动强度参数的影响

Fig.2 Effect of moisture content on dynamic strength parameters of compacted loess

由图 3 可以看出,在振次相同的情况下,压实黄土的动黏聚力 c_d 和动内摩擦角 φ_d 均随土体干密度的增大而增大。这是因为随着压实黄土干密度的增大,单位体积内的土颗粒数增加,促使黄土颗粒咬合更加紧密,在联结力增大的同时土颗粒间不易产生相对滑动,导致土体结构强度增加,表现为 c_d 和 φ_d 的同时增大。

由图 4 可以看出,振次相同时压实黄土的动黏聚力 c_d 和动内摩擦角 φ_d 均随加载频率的增大而增大。这是因为加载频率不同时,土体在动应力作用下的变形特点不同。低频时,在动应力作用下土体变形充分,在较少的振次下土体即被振松,土颗粒之间的摩擦力和咬合力减小;高频时,土体来不及在动应力下发生变形,需在更多的振次下才能达到低频较小振次下的变形效果。因此,与低频振动相比,高频时土的 c_d 和 φ_d 较大。

由图 2~图 4 可知,压实黄土的动黏聚力 c_d 和动内摩擦角 φ_d 均随振次的增加而减小并最终趋于稳定。这是由于初始状态下土体内部土颗粒之间呈现一种平衡和稳定的状态,产生一定的摩擦力和咬合力;随着在土体上持续施加动应力,动剪力逐渐将处于稳定位置的土颗粒拖离,导致土体从弹性变形阶段进入塑性变形阶段,土体被振松,土颗粒间的摩

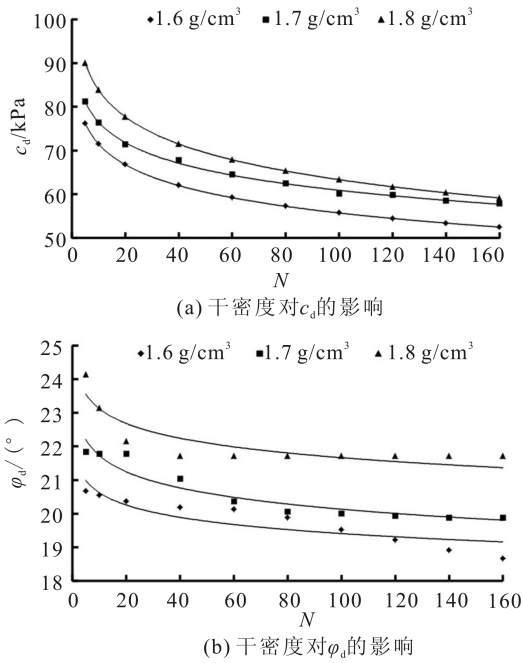


图 3 干密度对压实黄土动强度参数的影响

Fig.3 Effect of dry density on dynamic strength parameters of compacted loess

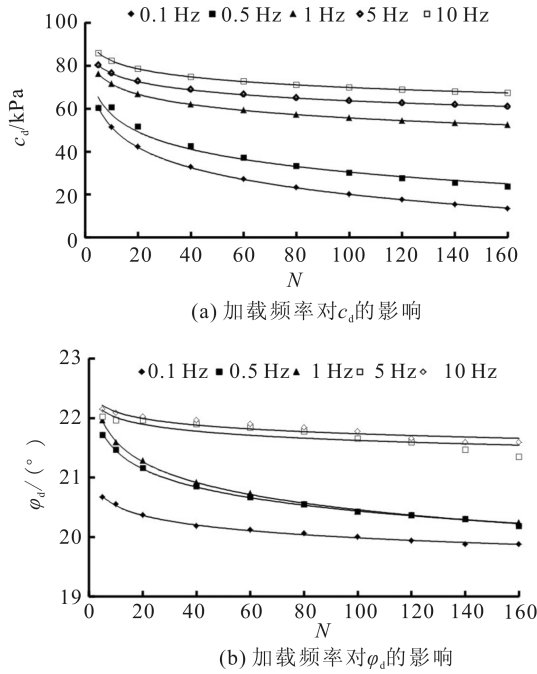


图 4 加载频率对压实黄土动强度参数的影响

Fig.4 Effect of loading frequency on dynamic strength parameters of compacted loess

擦力和咬合力减小,表现为黏聚力和内摩擦角的减小。随着振次的增加,土颗粒重新排列并重新达到一种稳定的平衡状态,表现为黏聚力和内摩擦角逐渐趋于稳定。

3 结论

本文利用英国进口的 GDS 振动三轴仪研究含水率、干密度和加载频率等因素对吕梁压实黄土动强度特性的影响,得出结论:

(1) 压实黄土的动强度和动强度参数均随振次的增加而减小,动强度和振次的关系可用对数方程进行拟合。

(2) 压实黄土的动强度和动强度参数均随含水率的增大而减小,随干密度和加载频率的增大而增大。

参考文献(References)

- [1] 王兰民.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003.
WANG Lan-min. Loess Dynamics [M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 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: 43-50.
- [3] 王志杰, 骆亚生, 王瑞瑞, 等. 不同地区原状黄土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1464-1469.
WANG Zhi-jie, LUO Ya-sheng, WANG Rui-rui, et al. Experimental Study on Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Undisturbed Loess in Different Regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1464-1469. (in Chinese)
- [4] 王志杰, 骆亚生, 杨利国, 等. 预剪应力作用下原状黄土动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊): 290-295.
WANG Zhi-jie, LUO Ya-sheng, YANG Li-guo, et al. Experimental Research on Dynamic Characteristics of Undisturbed Loess under Pre-shearing Stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp): 290-295. (in Chinese)
- [5] 王家鼎, 彭淑君, 马闫, 等. 高速列车振动荷载下水泥改良黄土动力学试验[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 35-41.
WANG Jia-ding, PENG Shu-jun, MA Yan, et al. Dynamic Tests on the Cement Improved Loess under the Vibratory Load[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 35-41. (in Chinese)
- [6] 谷天峰, 王家鼎, 任权, 等. 循环荷载作用下黄土边坡变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊): 3156-3162.
GU Tian-feng, WANG Jia-ding, REN Quan, et al. Study on Deformation of Loess Slope under Cyclic Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp): 3156-3162. (in Chinese)
- [7] 郭乐, 王家鼎, 谷天峰. 宝鸡市渭北台塬马兰黄土震陷特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 61-65.
GUO Le, WANG Jia-ding, GU Tian-feng. A Study of Loess Seismic Subsidence of Tableland to the North Weihe River in Baoji City[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(2): 61-65. (in Chinese)
- [8] 王念秦, 罗东海, 姚勇, 等. 马兰黄土动强度及其微结构变化实验[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 467-471.
WANG Nian-qin, LUO Dong-hai, YAO Yong, et al. Dynamic Strength and Microstructure Change of Malan Loess under Triaxial Cyclic Loading[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 467-471. (in Chinese)
- [9] 王峻, 石玉成, 王谦, 等. 天然含水率状态下原状黄土动强度特性研究[J]. 世界地震工程, 2012, 28(4): 23-27.
WANG Jun, SHI Yu-cheng, WANG Qian, et al. Study on Dynamic Strength Properties of Undisturbed Loess under Natural Moisture Content[J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(4): 23-27. (in Chinese)
- [10] 张希栋, 骆亚生, 王鹏程. 双向循环荷载耦合下黄土动模量和动变形特性研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 505-511.
ZHANG Xi-dong, LUO Ya-sheng, WANG Peng-cheng. Study on Dynamic Modulus and Dynamic Deformation Characteristics of Loess under Bidirectional Cyclic Loading [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 505-511. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 刘保健, 张晓荣, 程海涛. 应变控制下压实黄土的动三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1073-1076.
LIU Bao-jian, ZHANG Xiao-rong, CHENG Hai-tao. Study on Compacted Loess under Strain Control at Dynamic Triaxial Test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1073-1076. (in Chinese)
- [14] 李焱, 骆亚生, 谭东岳, 等. 振动频率对压实黄土动强度特性的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 130-133.
LI Yan, LUO Ya-sheng, TAN Dong-yue, et al. Effects of Vibration Frequency on Dynamic Strength Properties of Compacted Loess [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 130-133. (in Chinese)
- [15] 杨利国, 骆亚生, 王志杰. 中主应力对压实黄土动变形特性的影响[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增刊): 59-64.
YANG Li-guo, LUO Ya-sheng, WANG Zhi-jie. Effect of intermediate Principal Stress on Dynamic Deformation of Compacted Loess [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Supp): 59-64. (in Chinese)
- [16] 杨利国, 骆亚生, 李焱. 主应力轴旋转对压实黄土动变形特性的影响[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 392-397.
YANG Li-guo, LUO Ya-sheng, LI Yan. Effect of Principal Stress Rotation on Dynamic Deformation of Compacted Loess [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 392-397. (in Chinese)
- [17] 杨利国, 骆亚生, 李焱, 等. 初始应力条件对压实黄土动强度影

响的研究[J].岩土力学,2010,31(1):87-91.

YANG Li-guo, LUO Ya-sheng, LI Yan, et al. Research on Effect of Initial Stress Conditions on Dynamic Strength of Compacted Loess[J].Rock and Soil Mechanics,2010,31(1):87-91.(in Chinese)

[18] 李又云,谢永利,刘保健.路基压实黄土动力特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):1037-1046.

LI You-yun, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Experimental Research on Dynamic Characteristics of Roadbed Compaction Loess[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(5):1037-1046.(in Chinese)

[19] 谢定义.土动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1988.

XIE Ding-yi. Soil Dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press,1988.(in Chinese)

(上接 438 页)

[17] 杨和平,赵鹏程.膨胀土填料改进 CBR 试验方法的提出与验证[J].岩土工程学报,2007,29(12):1751-1757.

YANG He-ping, ZHAO Peng-cheng. Suggestion and Verification on Modified CBR Test Method for Expansive Soils Fill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (12):1751-1757.(in Chinese)

[18] 杨和平,湛文涛.南宁膨胀土做路堤填料的土性试验[J].中国公路学报,2011,24(1):1-7.

YANG He-ping, ZHAN Wen-tao. Soil Property Testing of Nanning Expansive Soil as Embankment Filler [J]. China Journal of Highway and Transport,2011,24(1):1-7.(in Chinese)

[19] 李志祥,胡瑞林.改良膨胀土路堤填筑含水率优化试验研究[J].工程地质学报,2005,13(1):113-116.

LI Zhi-xiang, HU Rui-lin. Experimental Study on Optimal Water Content of the Modified Experiment Clay Used as the Embankment Fills[J].Journal of Engineering Geology,2005, 13(1):113-116.(in Chinese)

[20] 郭爱国,孔令伟.石灰改良膨胀土施工最佳含水率确定方法探讨[J].岩土力学,2007,28(3):517-521.

GUO Ai-guo, KONG Ling-wei. On Determination of Optimum Water Content of Lime-treated Expansive Soil[J].Rock and Soil Mechanics,2007,28(3):517-521.(in Chinese)