

随机地震荷载对黄土强度的影响效应

邓龙胜^{1,2,3}, 范 文^{1,2,3}, 彭湘林¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 西部地质资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 国土资源部岩土工程开放研究实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要:根据场地的区域等震线资料,通过统计回归和转换的方法,得到场地的地震烈度衰减关系和地震动衰减关系,并人工合成场地未来 50 年超越概率 10% 的地震动时程,据此对取自宁夏西吉县夏家大路喜家湾滑坡后壁的黄土开展动三轴试验,研究动围压与动轴压之比,以及地震荷载的扰动作用对黄土强度的影响。研究表明:当动围压与动轴压之比 k 值较小时, k 的变化对土体的强度影响较小,随着 k 值的增大,对于同样的破坏标准,需要更大的动应力;当 $k > 1$ 时,随着偏应力的增大,所需动应力减小;在低固结压力条件下,地震动会造成黄土的骨架破损,降低其强度,并且降低的程度随动荷载幅值的增大而增大;在高固结压力条件下时,较大的动应力会使土体进一步压密,产生较大的前期残余变形,但其抗剪强度有一定提高。

关键词:地质工程;随机地震荷载;黄土;黄土强度;动三轴试验

中图分类号:P65

文献标志码:A

Effect of stochastic seismic load on loess strength

DENG Long-sheng^{1,2,3}, FAN Wen^{1,2,3}, PENG Xiang-lin¹

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering of the Ministry of Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The seismic intensity and acceleration attenuation relationship of the field were studied using the method of regression and conversion analysis and based on its macrograph intensity data, the earthquake wave of the field with 10% exceedance probability in the following 50 years was gained which was used to carry out the dynamic triaxial test with the sample from Xiajiadalu village, Xiji county of Ningxia province, to research the effect of axes and surround dynamic load ratio, and stochastic seismic load on the reduction of loess strength. The results show that if the axes and surround dynamic load ratio k is small, the change of k influences loess strength limitedly, but along with the increase of k , the bigger dynamic stress is needed to produce certain deformation, and if $k > 1$, with the increase of deviatoric stress, the smaller dynamic stress is needed. In addition, action of earthquake load will damage the framework of loess and reduce its strength in condition of lower concretion pressure, and the degree of strength reduction increase with the increase of amplitude of dynamic load, but if the sample is in condition of higher con-

收稿日期:2012-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41302251);陕西省自然科学基金项目(2013JQ5005);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC172)

作者简介:邓龙胜(1981-),男,云南镇雄人,讲师,工学博士,E-mail:deng32120@yahoo.com.cn.

tion pressure, the bigger dynamic load will make the sample denser, so as to produce bigger residual deformation but the shear strength will be increased. 11 figs, 14 refs.

Key words: geological engineering; stochastic seismic load; loess; strength of loess; dynamic tri-axial test

0 引言

黄土由于其大孔隙的架空结构,具有强烈的地震易损性,在地震荷载作用下,常常发生震陷、液化和地震滑坡等地震地质灾害。大批学者在黄土的动本构关系、黄土地震地质灾害等方面取得了丰硕的研究成果。谢定义等开展大量的黄土力学试验,提出若干黄土力学研究的新方向^[1];张振中开展了大量黄土地震滑坡的现场考察工作,特别是海原地震引发的大量黄土地震滑坡^[2];王兰民等进行了大量黄土动力学试验,主要研究动荷载作用下黄土的本构关系、黄土的震陷机理等^[3];骆亚生等主要开展黄土的动本构的研究^[4];石玉成等重点研究黄土在地震荷载作用下的震陷、液化机理^[5-6];Ishihara 等主要研究黄土在地震荷载作用下的液化致灾机理^[7]。动三轴试验是研究黄土动强度的主要手段之一,通常首先将试样固结,之后在轴向施加动荷载进行动剪切,试样处于较简单的应力状态。然而在实际中,由于基岩面的起伏变化较大,加上上覆地层的层理性,地震波从基岩向上传播时,在土体中将产生大量的反射和折射,场地处于多波耦合作用中,土体处于极其复杂的动应力状态。当黄土遭受强烈的动力作用时,将产生震陷、液化、地震滑坡等地震地质灾害,但当动荷载作用较弱时,也会引起黄土大孔隙架空结构的骨架破损,导致抗剪强度的衰减,降低场地土体的稳定性。

地震荷载是一种振幅、频谱及持时均不规则变化的随机动荷载,并受到震源特性、传播介质及场地条件等的控制,而地震荷载的这些特性,对黄土的动力响应具有较大的影响^[8-9]。在以往对黄土动力特性的研究中,大家往往选用 EL Centro 地震波、某地的地震记录或者人造地震动作为输入激振波,这和场地可能遭遇地震荷载的频谱特性、持时等具有较大的差异,用这样的地震动时程进行试验,有可能得到不符合实际的试验结果。为此,本文充分利用研究区的宏观震害资料,在地震危险性分析的基础上,人工合成适合于场地的地震动时程。

1 输入地震动时程的人工合成

本文对取自宁夏南部西吉县夏家大路喜家湾地震滑坡后壁的黄土进行动三轴试验。主要工作包括:①选取研究区周围大于 300 km 范围内的等震线资料,通过统计回归和转换的方法,得到了研究区的地震烈度衰减关系和地震动衰减关系,并人工合成场地未来 50 年超越概率 10% 的地震动时程;②以人工合成的地震动时程作为输入激振波,研究黄土在多向地震荷载作用下的变形、强度特性;③研究地震波的扰动引起黄土的强度衰减。

1.1 地震动衰减关系

根据相关的地震资料文献及地震烈度衰减关系的通常做法,选取研究区周围约 300 km 范围内 1900 年以来有仪器记录震级和等震线的 4.8 级以上的 25 个地震资料,共 76 条等震线^[10]。采用陈达生等提出的椭圆长、短轴联合衰减模型,通过统计回归的方法,得到研究区的地震烈度衰减关系,其表达式为^[11]

$$\begin{aligned} I_a &= 1.744\ 6 + 1.402\ 6M - \\ &\quad 0.956\ 1\ln(R_a + 9.00) - 0.003\ 1R_a \\ I_b &= 0.887\ 3 + 1.402\ 6M - \\ &\quad 0.897\ 0\ln(R_b + 4.00) - 0.002\ 2R_a \\ \sigma &= 0.641 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: M 为震级; R_a 、 R_b 分别是烈度为 I 的椭圆等震线的长半轴和短半轴长度; σ 为标准差; I_a 、 I_b 分别为椭圆等震线的长半轴和短半轴地震烈度。

采用胡聿贤等提出的确定缺乏强震资料地区地震动参数衰减关系的方法,加速度衰减模型采用霍俊荣提出的考虑震级饱和与距离饱和的衰减关系模型,如式(2)^[12]

$$\begin{aligned} \lg(S_a) &= c_1 + c_2M + c_3M^2 + \\ &\quad c_4\lg[R + c_5e^{c_6M}] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: S_a 为加速度; R 为震中距; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c_6 均为回归系数。

选取美国西部地区作为参考区,采用中国地震局“十五”重点科研课题对美国西部地震动参数衰减

关系研究成果,采用等距离法进行转换分析,得到了研究场地的地震动衰减关系反应谱系数^[13]。峰值加速度在长、短轴方向随距离的衰减关系,如图 1 所示(图中 g 为重力加速度)。其中 M_5 、 M_6 、 M_7 分别为第 5、第 6、第 7 震级。

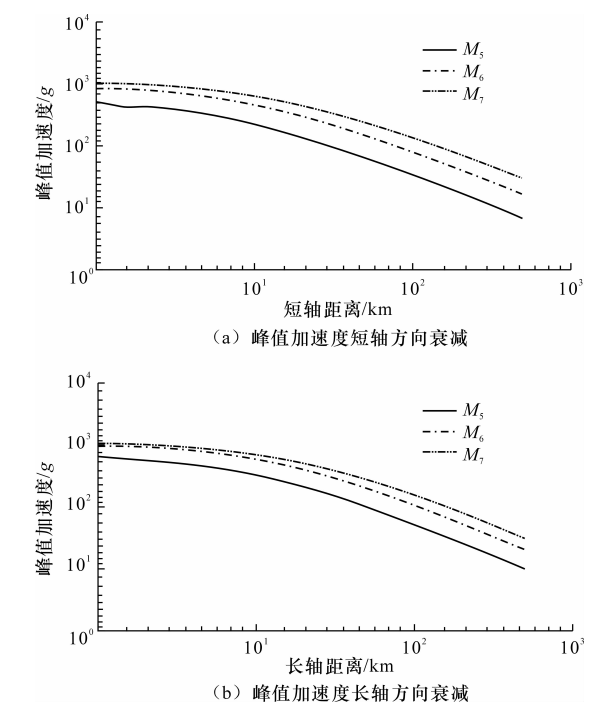


图 1 研究区峰值加速度衰减关系

Fig. 1 Attenuation relationship of acceleration peak values in investigated field

1.2 地震动时程的人工合成

根据研究场地的经纬度坐标以及各潜源参数,采用前面求得的衰减关系反应谱系数进行地震危险性分析,求得场地未来 50 年超越概率为 10% 的基岩地震动参数反应谱,并采用三角级数法进行地震动时程的人工合成,得到场地未来 50 年超越概率为 10% 的加速度时程,如图 2 所示。

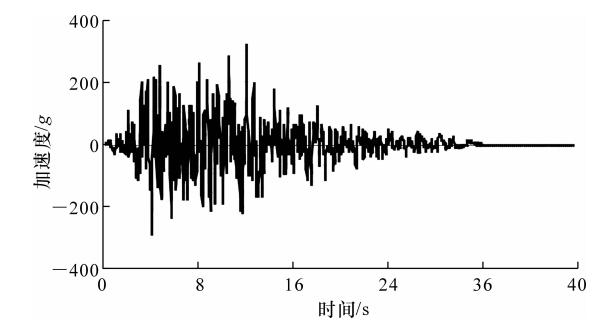
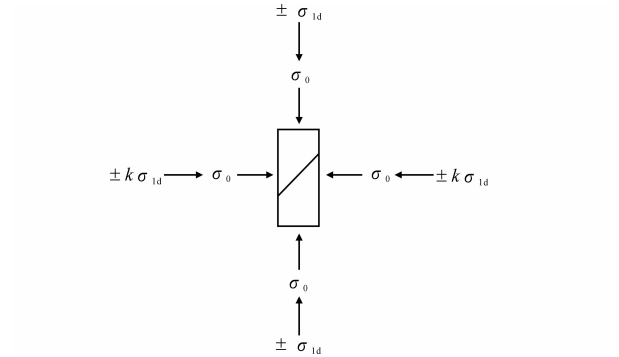


图 2 场地未来 50 年超越概率 10% 加速度时程曲线
Fig. 2 Earthquake wave of field with 10% exceedance probability in following 50 years

2 地震荷载作用方向的影响效应

设试样所受围压地震荷载和轴向地震荷载幅值之比为 k , 并且围压地震荷载和轴向地震荷载具有相同的相位, 则试样的受力如图 3 所示。



注: σ_0 为固结压力; σ_{1d} 为动应力。

图 3 试样多向施加动荷载

Fig. 3 Sample acted by triaxial dynamic load

以图 2 所示的地震动时程作为输入激振波, 根据波形转化为相应的电压码值进行控制, 研究不同 k 值的影响效应。

试验的取样深度为 4~18 m 的原状黄土, 试验土柱尺寸均为直径 39.1 mm、高 80 mm。由于动荷载作用下黄土的破坏与否是用残余应变来表示的, 因此, 本节采用文献[2]的方法, 对饱和试样进行固结不排水动三轴试验, 研究黄土在多向地震荷载作用下的残余应变特性。由于黄土的湿陷性, 目前国内对黄土的饱和并没完善的方法, 仍采用常规的饱和方法, 因此本文中采用抽气饱和法。

固结压力根据试样的取样深度, 分别考虑为 100、200、300 kPa, 固结比一般取为 1。选用 2 组试样, 试样的基本物理参数分别为: $\gamma=1.61\text{ g/cm}^3$ 、 $w_p=0.21$ 、 $w_L=0.27$ (试样①); $\gamma=1.31\text{ g/cm}^3$ 、 $w_p=0.20$ 、 $w_L=0.25$ (试样②) (γ 为密度; w_p 为塑限含水率; w_L 为液限含水率)。

下页图 4~图 7 给出了不同固结压力下 k 值分别为 0、0.25、0.5、1.0、2.0 时残余应变与动应力的关系曲线。图中, $\sigma_{1d\max}$ 为轴向动应力幅值, σ_{3d} 为围压动应力, ϵ_p 为轴向残余应变。

由图可见, 当 k 值较小, 接近于 0 时, k 值的变化对残余应变基本没有影响, 如图 4、图 5 中, $k=0$ 和 $k=0.25$ 时的 2 条曲线基本重合, 但是, 当 k 值进一步增大时, 在相同的动应力下将引起残余应变的急剧减小。当 $k=1$ 时, 土体处于静水压力加卸载状

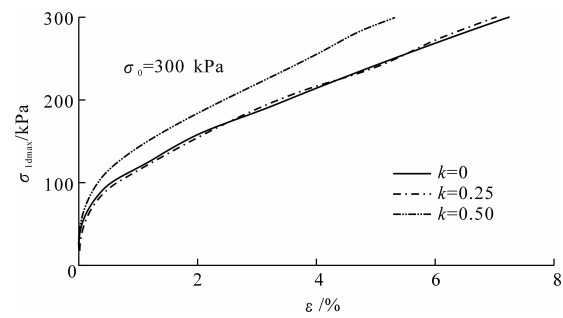


图 4 $\sigma_0=300$ kPa 时试样①动应力幅值-残余应变曲线
Fig. 4 Relationship of amplitude of dynamic load and residual strain of sample ① when σ_0 is 300 kPa

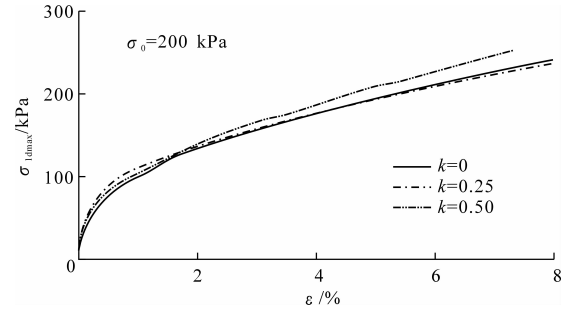


图 5 $\sigma_0=200$ kPa 时试样①动应力幅值-残余应变曲线
Fig. 5 Relationship of amplitude of dynamic load and residual strain of sample ① when σ_0 is 200 kPa

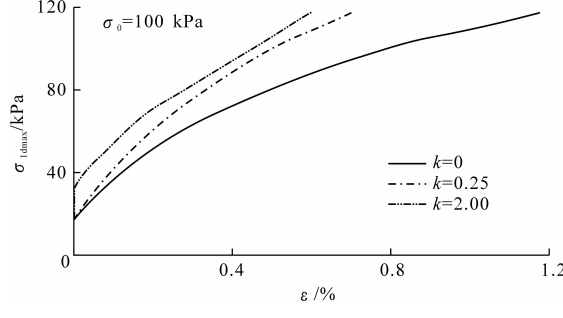


图 6 $\sigma_0=100$ kPa 时试样①动应力幅值-残余应变曲线
Fig. 6 Relationship of amplitude of dynamic load and residual strain of sample ① when σ_0 is 100 kPa

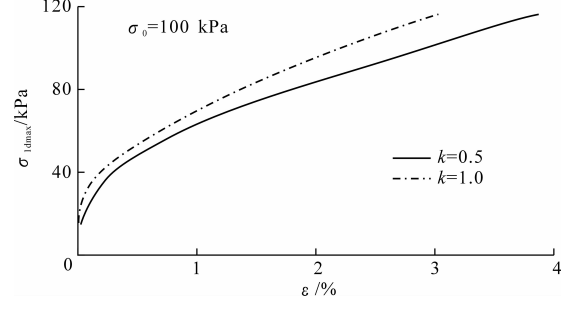


图 7 试样②动应力幅值-残余应变曲线
Fig. 7 Relationship of amplitude of dynamic load and residual strain of sample ②

态,此时动力作用引起的残余应变较小。当 $k>1$

时,主应力方向发生转向,此时, σ_3 方向为大主应力方向,则图 3 中剪切面上剪应力方向改为沿斜面向上,此时,在相同动应力作用下,引起土体的残余应变大于 $k=1$ 时的情况,但略小于 $k=0.5$ 时的情况。

若取残余应变 $\epsilon_p=3\%$ 作为地震波作用下破坏的标准,则可得 k 值对黄土强度的影响规律为:①当 k 值较小接近于 0 时,对动强度基本没有影响,此时破坏动应力最小;②随着 k 值的增大,对于同样的破坏标准,则需要更大的动应力,当 $k=1$ 时最大;当 $k>1$ 时,随着偏应力的增大,所需动应力减小。

3 地震荷载对黄土抗剪强度的影响

由于黄土的大孔隙架空结构,具有强烈的地震易损性,强震会破坏或扰动土体的结构,使土体产生一定的残余变形,改变了土体原有的强度特性。

本试验的具体方法是:首先将试样在应力控制条件下进行等压固结;固结稳定之后,对同一组试验的不同试样,施加不同动应力幅值的地震荷载进行振动;待地震荷载作用完毕,将试样的轴向应力控制条件变化为应变控制,围压仍然保持为应力控制并等于固结压力恒定不变;对试样通过轴向应变控制以恒定速度加载进行剪切试验,剪切应变速率根据三轴试验规范,按每分钟 0.1% 进行控制。试验按固结压力分别等于 100 kPa 和 200 kPa 分两组进行,对于固结压力为 100 kPa 的试验,动应力幅值 σ_{1dmax} 的大小分别按 0、50、100 kPa 进行试验;对于固结压力为 200 kPa 的试验,动应力幅值 σ_{1dmax} 的大小分别为 0、100、200 kPa。试验所用地震波形如图 2 所示,所用试样的相关物理参数如试样①所示。

下页图 8 给出了固结压力 σ_0 为 100 kPa 时,试样①在不同动应力幅值地震荷载作用后的剪应力-应变关系曲线。由图可见,动应力幅值对剪应力-应变关系有较大的影响。 $\sigma_{1dmax}=0$ 和 $\sigma_{1dmax}=50$ kPa 扰动土样的剪应力-应变曲线在小应变阶段基本重合,但随着应变的增长, $\sigma_{1dmax}=50$ kPa 的剪应力-应变关系曲线逐渐偏离 $\sigma_{1dmax}=0$ 时的曲线,且偏离量随着应变的增长逐渐增长。而对于 $\sigma_{1dmax}=100$ kPa 时的剪应力-应变曲线,从应变非常小时就与 $\sigma_{1dmax}=0$ 和 $\sigma_{1dmax}=50$ kPa 时的曲线相差较大,并且这种差值随着应变量的增大而急剧增大。从位置上, σ_{1dmax} 较大时土样的应力-应变曲线始终处于下侧。因此,若以相同的应变量为破坏标准,则动应力

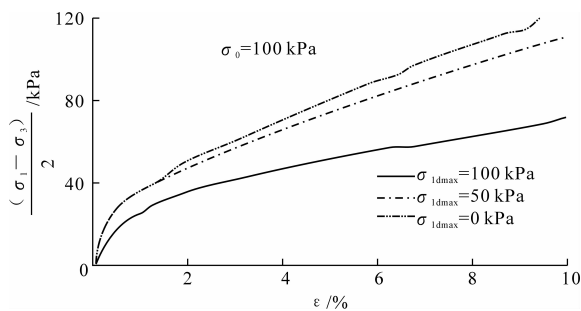


图 8 $\sigma_0=100$ kPa 时不同动应力扰动下的剪应力-应变曲线

Fig. 8 Relationship of shear stress and strain under different amplitudes of dynamic load when σ_0 is 100 kPa

大时,达到相同破坏标准所需的剪应力小,即地震波的扰动作用,降低了土体的强度。图 9 给出了土体抗剪强度 τ 随动应力幅值的变化关系,可见随着动应力幅值的增大,土体的抗剪强度呈非线性的降低,并且动应力幅值越大, τ 降低的程度越大。

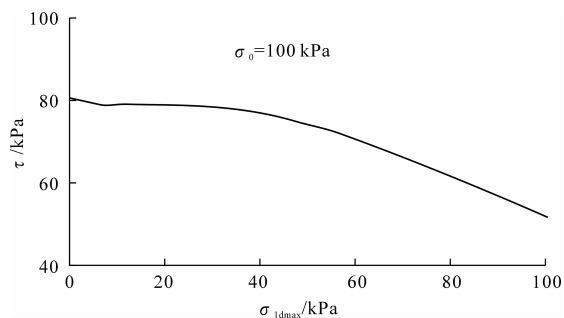


图 9 $\sigma_0=100$ kPa 时动应力幅值与抗剪强度关系曲线

Fig. 9 Relationship of amplitude of dynamic load and shear strength when σ_0 is 100 kPa

图 10 给出了固结压力 σ_0 为 200 kPa 时,试样①在不同动应力幅值地震波作用后的剪应力-应变关系曲线。由图可见,其剪应力-应变关系曲线随动应力幅值的变化规律与固结压力为 100 kPa 时具有一定的差异。当动应力与固结压力相比较小时,其剪应力-应变关系基本重合,但是,当动应力较大时,其剪应力-应变关系曲线将远离动应力为 0 和动应力较小时的曲线,并且,当应变大于 0.5% 以后,其偏离量随应变的增长基本不变。而其位置则与前述固结压力为 100 kPa 时相反, $\sigma_{1\max}=200$ kPa 的剪应力-应变曲线远处于上方,即动应力幅值的增大,反而增大了土体的抗剪强度,如图 11 所示。

这种现象的出现主要是因为此时土样所受的固结压力远大于上覆土层的重度,当较大的动应力对土体结构产生了更大的扰动作用时,破坏了土体的原有结构,使土体在三向受荷的条件下进一步压密。

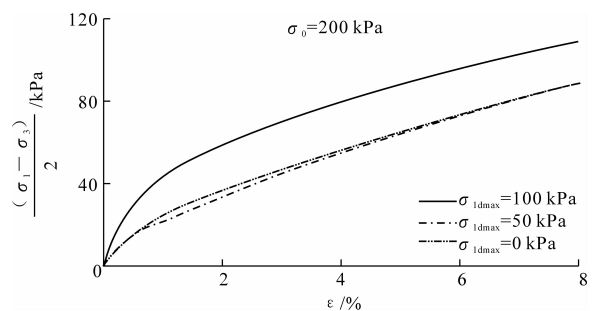


图 10 不同动应力扰动下的剪应力-应变曲线

Fig. 10 Relationship of shear stress and strain under different amplitudes of dynamic load

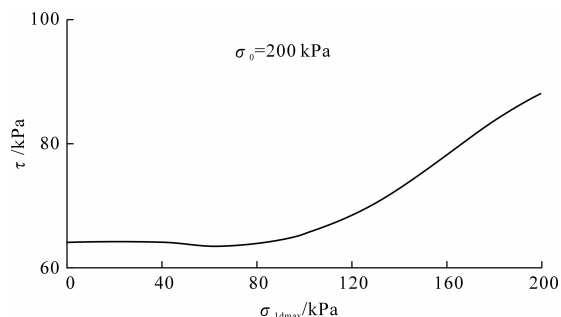


图 11 $\sigma_0=200$ kPa 时动应力幅值与抗剪强度关系曲线

Fig. 11 Relationship of amplitude of dynamic load and shear strength when σ_0 is 200 kPa

高固结压力、高动应力环境下的土体,实际上更密实,强度更高,但其前期的残余应变较大。

4 结 语

(1)选取研究区的强震资料,通过统计回归和转换的方法,得到了研究场地的地震烈度衰减关系和地震动衰减关系,并在地震危险性分析的基础上,人工合成场地未来 50 年超越概率为 10% 的地震动时程作为输入激振波进行动三轴试验,输入波的频谱、持时、幅值特性,能很好地体现场地条件和场地的地质构造背景。

(2)考虑不同的轴向和围压动应力比进行动三轴试验,研究动应力比的影响效应。由试验结果可见,当围压和轴向动应力比值 k 较小时,对土体的破坏强度影响较小,随着 k 值的增大,对于同样的破坏标准,需要更大的动应力,当 $k>1$ 时,随着偏应力的增大,所需动应力减小。

(3)在低固结压力情况下,地震荷载会造成黄土的骨架损伤,降低其抗剪强度,并且降低的程度随动荷载幅值的增大而增大。在高固结压力环境下,较大的动应力会使土体进一步压密,产生较大的前期

残余变形,但其后期抗剪强度有较大提高。

(4)对于具有大孔隙架空结构的典型 Q_3 黄土,地震荷载的扰动作用致使黄土骨架破损,引起强度衰减,衰减程度对黄土地震地质灾害的发生与否具有重要控制作用。为便于更准确的评价黄土地震地质灾害,需进一步开展地震荷载作用下黄土微观结构和宏观力学试验,建立地震荷载作用下黄土强度衰减的定量关系,研究强度衰减对黄土地震地质灾害的致灾机理。

参考文献:

References:

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.
XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13. (in Chinese)
- [2] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
ZHANG Zhen-zhong. The seismic disaster forecasting of loess[M]. Beijing: Seismic Press. (in Chinese)
- [3] 王兰民, 邓 津, 黄 媛. 黄土震陷性的微观结构量化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (1): 3025-3031.
WANG Lan-min, DENG Jin, HUANG Yuan. Quantitative analysis of microstructure of loess seismic subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (1): 3025-3031. (in Chinese)
- [4] 骆亚生. 非饱和黄土在动、静复杂应力条件下的结构变化特性及结构性本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
LUO Ya-Sheng. Study on the model and transformation of structure of unsaturated loess in complex stress condition[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [5] 石玉成, 李 兰. 黄土震陷变形特征的细观分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2829-2833.
SHI Yu-cheng, LI Lan. Micro-analysis on seismic subsidence characteristics of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2829-2833. (in Chinese)
- [6] 杨振茂, 赵成刚, 王兰民. 饱和黄土的液化特性与稳态强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (22): 3853-3860.
YANG Zhen-mao, ZHAO Cheng-gang, WANG Lan-min. Liquefaction behaviors and steady state strength of saturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3853-3860. (in Chinese)
- [7] Ishihara K, Okusa S, Oyagi N, et al. Liquefaction-induced flow slide in the collapsible loess deposit in Soviet Tajik[J]. Soils and Foundations, 1990, 30 (4): 73-89.
- [8] 刘妮娜, 门玉明, 刘 洋. 地震动力作用下土-地铁隧道模型分析[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 295-298.
LIU Ni-na, MEN Yu-ming, LIU Yang. Model test of soil and metro-tunnels interaction in earthquake activities[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(3): 295-298. (in Chinese)
- [9] 陈红旗, 彭建兵. 区域地震稳定性的区域地震动力学评价[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(4): 58-62.
CHEN Hong-qi, PENG Jian-bing. Exercising regional seismic dynamics to estimate seismic stability [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26 (4): 58-62. (in Chinese)
- [10] 陕西省地震局. 陕西分区地震动衰减关系研究[R]. 西安: 陕西省地震局, 2009.
Shaanxi Earthquake Administration. Seismic motion attenuation relations in Shaanxi areas[R]. Xi'an: Shaanxi Earthquake Administration, 2009. (in Chinese)
- [11] 陈达生, 刘汉兴. 地震烈度椭圆衰减关系[J]. 华北地震科学, 1989, 7(3): 31-42.
CHEN Da-sheng, LIU Han-xing. The ellipse attenuation of earthquake intensity[J]. North China Earthquake Sciences, 1989, 7(3): 31-42. (in Chinese)
- [12] 胡聿贤, 张敏政. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算方法[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(1): 1-11.
HU Yu-xian, ZHANG Min-zheng. The method of calculation the earthquake parameter in the areas lack of strong shock observation data[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, 4(1): 1-11. (in Chinese)
- [13] 邓龙胜. 强震作用下黄土边坡的动力响应机理和动力稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
DENG Long-sheng. Study on the response and stability mechanics of loess slope in environment of strong earthquake[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)