

DOI: 10.11779/CJGE2015S2028

微结构特性对饱和黄土动残余变形的影响研究

王 谦^{1, 2, 3}, 王 平^{1, 3}, 王 峻^{1, 3}, 钟秀梅^{1, 3}, 马海萍³, 冯敏杰^{1, 3}

(1. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;
3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过对黄土高原不同微结构分区的黄土进行微结构电镜扫描试验和饱和状态下的动三轴液化试验, 以及相同物性状态下兰州原状与重塑黄土液化的对比试验, 得出了饱和黄土结构性对抗液化强度的影响规律, 定性定量分析了微结构类型对饱和黄土动残余变形特征的影响关系, 并通过分析不同地区黄土的动应力-动残余应变, 得出了不同微结构特性黄土动残余变形发展的机制。研究结果表明: 饱和黄土的抗液化强度与其结构性有关, 重塑过程中由于颗粒重组和颗粒间胶结作用的减弱, 导致土体的抗液化强度降低; 饱和黄土液化时动残余变形随着振次增加呈指数关系增加, 拟合参数主要受控于黄土的密度和塑性指数, 动残余变形的增长与微结构特性关系密切, 结构强度越高的黄土动残余变形增长越缓慢; 不同微结构特性的黄土液化时动残余应变发展机理不同, 胶结性较弱的黄土动残余变形可划分为黏弹性阶段, 胶结性较强的黄土液化时依次产生黏弹塑性、黏塑性和塑性变形。

关键词: 黄土; 液化; 微结构; 变形特征

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0143-05

作者简介: 王 谦(1985-), 男, 甘肃临夏人, 助理研究员, 主要从事黄土动力学与地震工程理论与试验研究工作。
E-mail: wangq0930@126.com。

Effect of microstructure properties on dynamic residual deformation behavior of saturated loess

WANG Qian^{1, 2, 3}, WANG Ping^{1, 3}, WANG Jun^{1, 3}, ZHONG Xiu-mei^{1, 3}, MA Hai-ping³, FENG Min-jie^{1, 3}

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Schools of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the SEM tests and dynamic triaxial tests on the loess with different microstructures from the Loess Plateau region and the liquefaction tests on undisturbed and disturbed Lanzhou loess with the same property state, the influence rules of structural properties of saturated loess on liquefaction strength are obtained. The relationship between microstructural types and the dynamic residual deformation behavior of saturated loess are qualitatively and quantitatively analyzed. Moreover, the development mechanisms of the dynamic residual deformation of the loess with different microstructures are obtained through analysis of the dynamic stress-dynamic residual strain of the loess in different regions. The results show that the liquefaction strength of saturated loess relates to the micro structure. The liquefaction strength of the soil decreases during the disturbed process because the particle reorganization and the cementation are weakened. The dynamic residual deformation of the saturated loess exponentially increases with the increase of vibration times, and the fitting parameters are mainly controlled by the density and plasticity index of the loess. The increase of dynamic residual deformation closely relates to the microstructural properties, the higher the structural strength, the slower growth the dynamic residual deformation of the loess. The development mechanisms of dynamic residual deformation are different for the loess with different microstructural properties. The dynamic residual deformation of weak cementation loess can be divided into visco-elastoplastic and plastic stages. However, the dynamic residual deformation of stronger cemented loess can be divided into visco-elastoplastic, visco-plasticity and plastic stages successively during liquefaction.

Key words: loess; liquefaction; micro structure; deformation behavior

0 引言

我国黄土地区多位于高烈度地震区, 在这些地区, 大中城市多沿河谷呈长条形展布, 高坪地区城市

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408567); 甘肃省科技计划项目(1308RJZA153); 黄土地震工程重点实验室基金项目(KLLEE-12-003)
收稿日期: 2015-03-26

新区、工业开发区建设方兴未艾，广大农村地区灌溉条件逐步改善^[1]，使得黄土地震液化问题日益成为建设工程所面临的新的抗震问题。

土体的变形特性直接影响着建筑地基的稳定性。黄土具有架空的大、中孔隙，土体富含可溶性盐类，其在水和动力作用下产生的湿陷和震陷变形历来为工程界所关注。然而，相比于非饱和黄土，饱和黄土由于在水的作用下软化特性以及外力作用下的结构破坏的相互作用导致其变形特性十分复杂，这不仅在于土体本身由于受到水的作用使土中的可溶盐类溶解，胶结性减弱，从而使土体趋于软化；还在于因动力作用产生土体架空孔隙破坏，发生体积变形，最终导致土的强度完全丧失。因此，饱和黄土的动残余变形特性是影响其液化的重要原因。

土的结构性是指土颗粒和孔隙的形状和排列形式以及颗粒间的相互作用，天然土由于在沉积过程中受到气候、颗粒组成等条件的影响，多具有这种性质^[2]。黄土是一种典型的结构性土，对不同地区的结构性黄土的电镜扫描和粒度分析试验结果表明，黄土中的粗颗粒在沉积过程中形成了具有架空孔隙的土骨架，而细颗粒多分布在粗颗粒之间，在粗颗粒之间产生胶结力，从而使黄土具有一定的结构强度。

Puri^[3]对取自美国东部 Shelby 县的原状黄土和重塑黄土进行了等幅循环荷载下的动三轴液化试验，研究了饱和黄土的液化特性。王兰民等^[4,5]通过对我国、美国及俄罗斯黄土的液化特性进行对比，得出三种黄土的液化特性各不相同，但因液化产生的残余应变均可达到 4% 左右。吴敏哲等^[6]通过应力控制式循环三轴试验，探讨了地铁行车荷载作用下饱和黄土的累积塑性应变特征。胡伟等^[7]基于不排水动三轴试验研究了结构性饱和黄土的动力特性，提出结构性破坏影响土体动力变形的重要因素。余跃心等^[8]基于动、静三轴试验对饱和黄土液化后的大变形进行了研究。孙海妹等^[9]研究了兰州黄土液化过程中的变形特征。王峻等^[10]利用动三轴试验，对不同地区的饱和黄土液化特性进行了研究，结果表明动力作用下饱和黄土液化与结构性破坏导致的变形有关。王谦等^[11]通过不同干密度的击实黄土的动三轴试验，研究了饱和击实黄土的动应变特征。

由于黄土具有独特的风成特性，使得黄土的结构性存在地域差异。本项研究在文献[12, 13]中我国黄土的微结构类型和区域划分图的基础上，选取了不同分区的典型场地取样，通过电镜扫描试验和动三轴液化试验，以及相同物性状态下兰州原状与重塑黄土液化的对比试验，探讨了饱和黄土的结构性对抗液化强

度的影响和微结构特性对饱和黄土动残余变形特征的影响。研究结果可为进一步揭示饱和黄土的液化机理提供依据，为黄土地区建设工程抗液化设计提供理论参考。

1 室内试验

1.1 试样及试验仪器

试验中根据文献[12, 13]中我国黄土的微结构类型和区域划分结果，选择了位于不同微结构分区的甘肃兰州、宁夏固原、甘肃临夏和甘肃天水的 4 个场地取备原状黄土试。试样均为 Q₃ 黄土，取样深度均为 4 m。不同地区试样的物性指标如表 1 所示。

表 1 试验所用原状土样的主要物性参数

Table 1 Basic physical parameters of undisturbed loess

试样 编号	取样地	密度 (g·cm ⁻³)	天然含水 率/%	塑性 指数	颗粒组成/%		
					黏粒	粉粒	砂 粒
LZ	兰州	1.32	4.5	9.4	17.3	68.2	14.5
GY	固原	1.33	5.4	9.6	17.3	73.2	9.5
LX	临夏	1.39	12.6	9.9	18.5	74.0	7.5
TS	天水	1.54	16.5	11.2	30.5	62.8	6.7

本研究中采用 KYKY-2800B 型扫描电子显微镜观察所用土样的微结构并进行拍照。动三轴液化试验在 WF-12440 型动三轴-扭剪试验系统上完成，该系统配备了反压饱和系统，通过气转水系统给试样施加反压，可提高试验中的饱和速率和试样的饱和度。

1.2 试验方法

将经过自然干燥后的不同地区黄土制备成 10 mm×10 mm×2 mm 的方形薄片状试样，并在其表面喷金，用扫描电子显微镜观察其微结构并进行拍照，为了便于比较，显微图像的放大倍数均为 500 倍。

动三轴液化试验方法严格按照《土工试验规程》(SL237—017—1999)。试验过程分饱和、固结和循环剪切三步进行。其中饱和方法采用低反压饱和法，试验证明该方法可在较短的时间内使黄土试样的饱和度达到 90% 以上，且试样的变形较小。试样在固结时固结压力分别选用 100, 150, 200 kPa，固结比 $K_c=1.0$ 。循环剪切时动荷载选用频率为 1 Hz 的等幅正弦荷载，为了便于结果的比较，试样的液化破坏标准统一选用应变标准，即动应变 $\varepsilon_d=3\%$ ，且动孔隙水压力系数 $U_d/\sigma'_0>0.2$ 。

为了研究结构性对饱和黄土抗液化强度的影响，研究中选取了兰州黄土制备与原状黄土密度、含水率相同的重塑试样进行动三轴试验，试验参数的选取与原状黄土动三轴试验相同。

2 试验结果

2.1 SEM 试验结果

不同地区黄土试样的电镜扫描试验结果如图 1 所示。

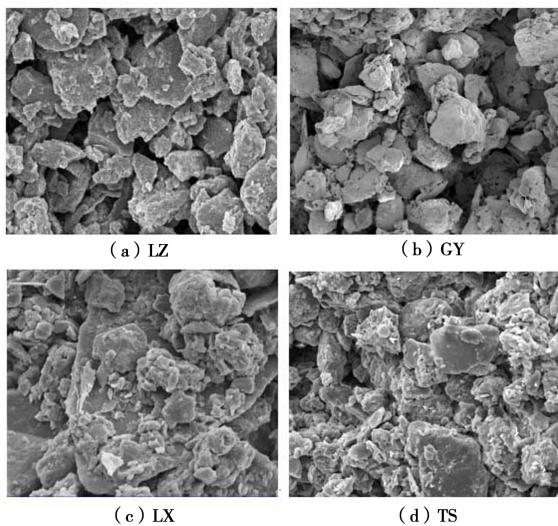


图 1 不同地区黄土的微结构照片

Fig. 1 Microstructural photos of loess in different regions

图 1 (a) 中, 兰州黄土粗颗粒组成的土骨架结构清晰, 颗粒堆积形成的中大孔隙明显可见, 颗粒之间不存在或仅有少量的团絮状细颗粒胶结物, 土体胶结性较弱; 图 1 (b) 中试样为固原黄土, 粗颗粒构建的土骨架及架空大孔隙较为清晰, 但粗颗粒之间存在有部分团絮状胶结物; 图 1 (c) 中临夏黄土的微结构扫描照片显示该黄土中存在有较多粗颗粒和一定数量的架空孔隙, 以及较多的细颗粒和部分团絮状、凝块状胶结物; 图 1 (d) 为天水黄土的微结构照片, 该黄土仅有部分粗颗粒物质可见, 孔隙也以小孔隙为主, 而团絮状的细粒物质更多, 呈现凝块状, 胶结性较强。

2.2 动三轴液化试验结果

采用液化应力比 ($\sigma_d / 2\sigma'_0$) - 振次 (N_f) 曲线表示不同地区结构性饱和黄土试样动三轴液化试验的结果, 如图 2 所示。由图 2 可知: 饱和黄土的液化应力比随动应力循环次数的增长而减小, 不同结构性饱和黄土的液化应力比关系曲线都具有相似的变化趋势。同一振次下天水黄土的液化应力比最大, 临夏黄土次之, 再次是固原黄土, 兰州黄土的液化应力比最小。对试验数据的拟合结果表明, 临夏黄土试验数据离散性最小, 固原黄土离散性最大, 这主要是由同组土样物理指标的差异性导致的。

3 试验结果分析

3.1 饱和黄土的结构性对抗液化强度的影响

土体的抗液化强度 τ 的计算式如下:

$$\tau = C_r \frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \sigma'_v , \quad (1)$$

式中 σ'_v 为有效自重应力; C_r 为修正系数; $\sigma_d / 2\sigma'_0$ 为液化应力比。由于原状和重塑黄土的密度、含水率相同, 计算时 σ'_v 、 C_r 视为常数。因此, 可通过液化应力比考察饱和黄土结构性对抗液化强度的影响。

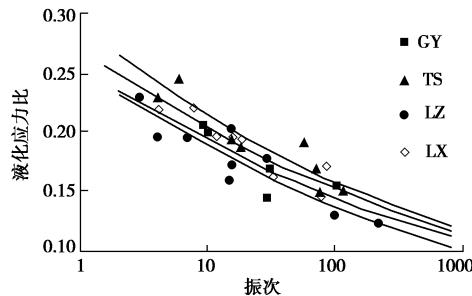


图 2 动三轴液化试验结果

Fig. 2 Results of dynamic triaxial tests

图 3 为兰州原状与重塑黄土的液化应力比 ($\sigma_d / 2\sigma'_0$) - 振次 (N_f) 曲线, 其中 LZ-YZ 为原状土, LZ-CS 为重塑土。从图 3 可知, 在相同的振次下, 原状黄土的液化应力比大于重塑黄土的液化应力比。在密度、颗粒组分相同的情况下, 重塑黄土液化应力比的降低显然是由于重塑过程中土体原有结构性的破坏导致的。可见, 黄土的结构性对其抗液化强度具有一定的影响, 重塑过程中由于颗粒重组和颗粒间胶结作用的减弱, 导致土体的抗液化强度降低。从图 3 中还可以看出, 随着振次的增加, 原状与重塑黄土液化应力比差值有减小的趋势, $N_f=10$ 时, 原状与重塑黄土液化应力比差值为 0.01, 而 $N_f=100$ 时, 这一差值为 0.007, 这说明振动作用下随着振次的增加, 架空大孔隙部分崩塌, 颗粒重新排列, 土体结构性减弱, 结构性对抗液化强度的影响也随之减小。

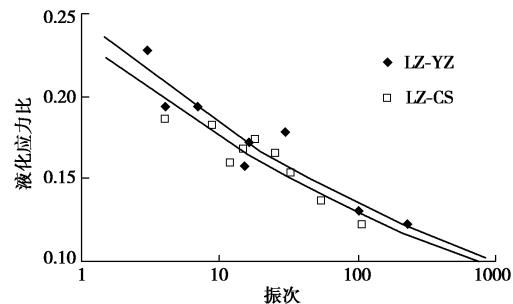


图 3 兰州原状与重塑黄土的液化曲线

Fig. 3 Liquefaction curves of undisturbed and disturbed Lanzhou loess

3.2 微结构特性对饱和黄土动残余变形特征的影响

为了研究微结构特性对饱和黄土动残余变形特

征的影响,根据动三轴试验结果,选择不同地区动应力大小相同($\sigma_d=40\text{ kPa}$)、饱和度相近($S_r=90.5\% \sim 94.4\%$)、固结条件相同($\sigma_3=100\text{ kPa}$)的一组试样,绘制饱和黄土液化动应变-振次关系曲线,如图4所示。根据图4,不同地区饱和黄土的动应变随着循环振次的增加而逐渐变大,其变化趋势具有一开始缓慢增长,在动残余应变为0.5%左右时变形开始逐渐增大,当动残余应变超过3%时在几个周期内产生失稳破坏的特点。其中,兰州黄土达到破坏需要的循环周期最少,天水黄土液化破坏需要的循环周期最多。

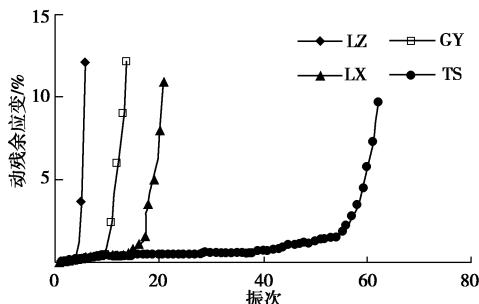


图4 饱和黄土液化时动残余应变 ε_p -振次 N_f 曲线

Fig. 4 ε_p - N_f curves of saturated loess during liquefaction

根据文献[12, 13]中我国黄土的微结构类型和区域划分图,结合电镜扫描试验结果可知,饱和状态下,尽管黄土颗粒间的可溶性盐溶解,结构强度降低,处于亚稳定状态,但是细颗粒物质所起的胶结作用依然存在,而不同结构性饱和黄土中细颗粒含量和微结构特性存在差异,因此在动荷载作用下其液化时的动残余变形特性不同。兰州黄土由于具有大孔隙、弱胶结的特性,动荷载作用下结构强度急剧丧失而导致失稳破坏;固原黄土由于颗粒较粗,颗粒间存在部分细粒胶结,动荷载作用下在 $N_f=13$ 次时失稳破坏;临夏黄土由于一定量粗颗粒和较多细粒凝聚状胶结物的存在,结构强度较兰州、固原黄土高,动荷载作用下在 $N_f=18$ 次时破坏;天水黄土胶结性最好,因而动荷载作用下应变增长缓慢,不易液化破坏。

对图4中动残余应变 ε_p 和振次 N_f 的关系进行拟合,发现动残余应变 ε_p 随着振次 N_f 的增加呈指数增加,如式(2)所示。各条拟合曲线的相关系数 R 均大于0.901。

$$\varepsilon_p = ae^{bN_f} \quad (2)$$

式中, a 、 b 为拟合参数。通过研究上述不同地区黄土的密度、干密度和塑性指数与拟合参数 a 、 b 之间的关系,发现 a 值与密度线性相关,相关系数为0.964; b 值与塑性指数具有较好的相关性,相关系数为0.838。

土的动应力-动残余应变滞回曲线反映了土体在动力作用下的滞后性和变形累积特性。其中,滞后性表征了黏性土体阻尼的影响;变形累积特性表征了

土在动力作用下产生的不可恢复性的结构破坏。不同地区饱和黄土液化时动应力-动残余应变滞回关系曲线如图5所示。从图5可知:兰州黄土从初始液化到液化破坏所需的循环次数最小,固原黄土次之,再次为临夏黄土,天水黄土的循环次数最大;相同动荷载作用下兰州、固原和临夏黄土的累积残余变形较大,而天水黄土的累积残余变形较小。由此可见,具有不同微结构特征的饱和黄土液化时动残余应变发展的机理不同,对于胶结型较弱的黄土(如兰州黄土),饱和后胶结性能进一步减弱,动残余变形经过几个周期的黏弹塑性阶段后,直接进入塑性变形阶段,试样失稳破坏;而胶结性能较好的黄土(如天水黄土),在动荷载作用下产生残余变形,但其中起胶结作用的细粒物质仍具有一定的抗破坏能力,初始液化后滞回曲线大小、形状相近,处于黏弹塑性变形阶段;进而滞回曲线差异逐步增大,处于黏塑性变形阶段;最终滞回曲线面积急剧增大,处于塑性变形阶段,土样失稳破坏。

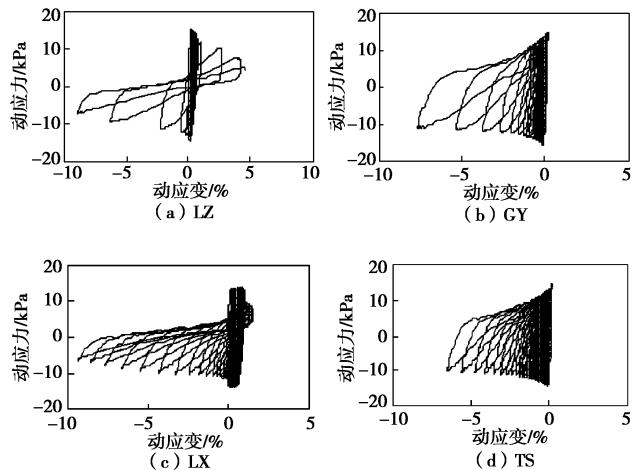


图5 不同地区黄土的动应力-动残余应变滞回曲线

Fig. 5 Relationship between dynamic stress and dynamic strain of loess in different regions

4 结论

通过研究可得出以下结论:

(1)饱和黄土的结构性对其抗液化强度具有一定影响,重塑过程中由于颗粒重组和颗粒间胶结作用的减弱,导致土体的抗液化强度降低;振动作用下随着振次的增加,架空大孔隙部分崩塌,颗粒重新排列,土体结构性减弱,结构性对抗液化强度的影响也随之减小。

(2)不同地区饱和黄土的动应变随着循环振次的增加而逐渐变大,其变化趋势具有一开始缓慢增长,在动残余应变为0.5%左右时变形开始逐渐增大,当动残余应变超过3%时在几个周期内产生失稳破坏的特

点; 饱和黄土液化时动应变的变化主要受微结构特性的影响, 胶结性越强, 液化破坏所需的变形能最大。

(3)饱和黄土液化时动残余变形随着振次增加呈指数关系增加, 拟合参数主要受控于黄土的密度和塑性指数, 动残余变形的增长与微结构特性关系密切, 其中 a 值与密度线性相关, 相关系数为 0.964, b 值与塑性指数具有较好的相关性。

(4)不同微结构特性的黄土液化时动残余应变发展机理不同, 胶结性较弱的黄土动残余变形可划分为黏弹性阶段, 胶结性较强的黄土液化时依次产生黏弹性、黏塑性和塑性变形。

参考文献:

- [1] 刘汉龙. 土动力学与土工抗震研究进展综述[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(4): 1 - 17. (LIU Han-long. A review of recent advances in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(4): 1 - 17. (in Chinese))
- [2] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(6): 775 - 779. (HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Research on structure behavior of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(6): 775 - 779. (in Chinese))
- [3] PURI V K. Liquefaction behavior and dynamic properties of loessial (Silty) soils[D]. Missouri: University of Missouri-Rolla, 1984.
- [4] WANG Lan-min, HWANG H, LIN Y, et al. Comparison of liquefaction of loess in China, USA and Russia[C]// Proc 4th International Conference on Recent Progress on Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Diego USA, 2001.
- [5] HWANG H, WANG Lan-min, YUAN Zhong-xia. Comparison of liquefaction potential of loess in Lanzhou, China, and Memphis, USA[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, **20**: 389 - 395.
- [6] 吴敏哲, 张柯, 胡卫兵, 等. 地铁行车荷载作用下饱和黄土的累积塑性应变[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, **43**(3): 316 - 322. (WU Min-zhe, ZHANG Ke, HU Wei-bing, et al. Cumulative plastic strain of saturated loess due to metro traffic loading[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2011, **43**(3): 316 - 322. (in Chinese))
- [7] 胡伟, 韩建刚. 结构性饱和黄土动力特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(5): 648 - 655. (HU Wei, HAN Jian-gang. Laboratory testing study of dynamic properties of saturated loess for effect of its internal structure[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(5): 648 - 655. (in Chinese))
- [8] 余跃心, 刘汉龙, 高玉峰. 饱和黄土孔压增长模式与液化机理的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(4): 395 - 399. (SHE Yue-xin, LIU Han-long, GAO Yu-feng. Study on liquefaction mechanism and pore water pressure mode of saturated original loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(4): 395 - 399. (in Chinese))
- [9] 孙海妹, 王兰民, 王平, 等. 饱和兰州黄土液化过程中孔压和应变发展的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **21**(11): 3464 - 3468. (SUN Hai-mei, WANG Lan-min, WANG Ping, et al. Experimental study of development of strain and pore water pressure during liquefaction of saturated Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **21**(11): 3464 - 3468. (in Chinese))
- [10] 王峻, 王兰民, 王平, 等. 不同地区饱和黄土液化特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, **38**(5): 54 - 56. (WANG Jun, WANG Lan-min, WANG Ping, et al. Study on liquefaction characters of saturated loess in different regions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, **38**(5): 54 - 56. (in Chinese))
- [11] 王谦, 王兰民, 王峻, 等. 基于密度控制理论的饱和黄土地基抗液化处理指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(S2): 844 - 847. (WANG Qian, WANG Lan-min, WANG Jun, et al. Indices of anti-liquefaction treatment of saturated compacted loess foundation based on theory of density control[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 844 - 847. (in Chinese))
- [12] 王永炎, 林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990. (WANG Yong-yan, LIN Zai-guan. The China loess structure features and its physical and mechanical properties[M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese))
- [13] 邓津, 王兰民, 张振中, 等. 我国黄土的微结构类型与震陷区域划分[J]. 地震工程学报, 2013, **35**(3): 664 - 670. (DENG Jin, WANG Lan-min, ZHANG Zheng-zhong, et al. The China loess microstructure types and its seismic subsidence zones divided[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, **35**(3): 664 - 670. (in Chinese))

(本文责编 明经平)