

DOI: 10.11779/CJGE2021S1013

# 中美原状黄土微观特征及液化差异性研究

王 谦<sup>1</sup>, 刘钊钊<sup>1</sup>, 钟秀梅<sup>1</sup>, 刘富强<sup>1</sup>, Seth Carpenter<sup>2</sup>, 王振明<sup>2</sup>, 马海萍<sup>1</sup>, 马紫娟<sup>1</sup>

(1. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 美国肯塔基大学 肯塔基地质调查局, 肯塔基 列克星敦 40506)

**摘 要:**中国黄土高原和美国密西西比河流域均发生了严重的黄土地震液化灾害。采用扫描电镜测试、颗粒分析试验和XRD矿物成分测试,研究了中、美黄土的微观特征差异性,并结合动三轴液化试验结果,分析了土体微观特征差异性对液化特性的影响,探讨了造成中、美黄土液化势差异的微观机理。研究表明:相较于中国黄土,密西西比黄土的颗粒间以面接触为主,胶结物更多,孔隙尺度更小,孔隙率、平均孔隙面积和分形维数均较小,土体中不含白云石,且黏土矿物含量较多,粒径级配更优,孔隙排列更为整齐,土骨架结构强度更大,使得其具有较为优良的动力稳定性。微观特征差异是导致中、美黄土液化特性存在差别的主要内因,相比于中国黄土,密西西比黄土结构强度、比表面积和亲水矿物含量均较大,使得其动应变增长较为缓慢,抑制动孔隙水压力发展的能力更优,抗液化能力更强。

**关键词:**黄土高原;密西西比河;液化;扫描电镜;粒度;矿物成分

中图分类号:TU43

文献标识码:A

文章编号:1000-4548(2021)S1-0071-05

**作者简介:**王 谦(1985—),男,副研究员,博士,主要从事黄土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: wangq0930@126.com。

## Difference in micro-properties and liquefaction of undisturbed loess in China and USA

WANG Qian<sup>1</sup>, LIU Zhao-zhao<sup>1</sup>, ZHONG Xiu-mei<sup>1</sup>, LIU Fu-qiang<sup>1</sup>, Seth Carpenter<sup>2</sup>,  
WANG Zhen-ming<sup>2</sup>, MA Hai-ping<sup>1</sup>, MA Zi-juan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration & Gansu Province, Lanzhou 730000, China;

2. Kentucky Geological Survey, University of Kentucky, Lexington 40506, USA)

**Abstract:** Both the Loess Plateau (LP) in China and the Mississippi River Valley (MRV) in the USA have serious loess liquefaction disasters triggered by strong earthquakes. However, the liquefaction characteristics in the two regions are different. To analyze the difference in the micro-characteristics including the microstructure, particle size and mineral composition of the undisturbed loess sampled from the LP and the MRV, a series of scanning electron microscope tests, grain size analysis and X-ray diffraction tests are conducted. Besides, the difference in liquefaction behaviors between the loess in the two regions is discussed based on the dynamic triaxial tests. The results show that compared with the LP loess, the MRV loess has more cement, smaller pore sizes, more clay particles and clay minerals, which forms a typical clotted cementation structure among the particles. The porosity, the average pore area and the fractal dimension of the MRV loess are significantly lower than those of the LP loess, causing that the liquefaction resistance of the MRV loess is significantly stronger. The differences of micro-characteristics are the main internal reason for the differences in liquefaction characteristics between the LP loess and the MRV loess. Compared with those of the LP loess, the structural strength, the specific surface area and the hydrophilic mineral content of the MRV loess are larger, which makes the dynamic strain growth be slower and the ability to restrain the development of dynamic pore water pressure be better.

**Key words:** Loess Plateau; Mississippi River; liquefaction; SEM; grain size; mineral composition

## 0 引 言

黄土是具有架空孔隙、弱胶结和富含可溶性盐的特殊松散沉积物,其在中国黄土高原地区和美国中部的密西西比河流域均有广泛分布。黄土具有特殊的水理特性和强烈的水敏性,在饱和或高含水率状态下,土体抗剪强度显著降低,刚度下降,表现为遇水软化的特

征。同时,黄土还具有强烈的震敏性和动力易损性,在强地震等动荷载作用下,饱和黄土由于胶结性下降而导致孔隙崩塌和颗粒重排,孔隙体积的压缩使得孔

**基金项目:**地震科技星火计划项目(XH21036, XH20057);国家自然科学基金项目(51778590);甘肃省地震局创新团队项目(2020TD-01-01)  
**收稿日期:**2020-12-28

隙水压力上升,有效应力降低,土体结构强度进一步下降并在动荷载的持续作用下产生液化破坏。国内外发生在黄土地区的多次强震均造成了黄土液化灾害,导致了人员伤亡和财产损失<sup>[1-2]</sup>。

目前,中、美有关黄土液化的研究均主要从宏观、细观和微观等不同的尺度关注了饱和黄土的液化特性、机理、判别和评价方法<sup>[3-7]</sup>。中国黄土高原的黄土是由于干旱、半干旱的大陆性气候形成的风沙沉积物,来源于戈壁沙漠,形成于中国大陆第二级阶梯之上,具有塬、梁、峁、阶地等多种复杂的地貌特征。而美国中部黄土则是在潮湿气候中形成的河流沉积,系由密西西比河、俄亥俄河等河水冲刷、淤积形成,且以河流阶地为主<sup>[7]</sup>。由于中、美黄土的成因、物源、地层和地形等条件均存在差异,使得其微观特征和宏观的力学性能也存在明显的不同,从而导致液化机制和成灾模式的差异。然而,目前有关中、美黄土微观特征和液化特性差异的研究较少,仅有的研究中只对比了中、美黄土的液化势<sup>[8]</sup>,而对于中、美黄土的液化机制及其影响因素方面的研究尚十分缺乏,使得现有的成果难以对中、美黄土地震液化灾害的成灾模式的灾害机理差异性研究起到支撑作用。

本文以中国黄土高原地区黄土和美国中部黄土为研究对象,通过微观结构电镜扫描测试、颗粒分析试验和 X 射线衍射测试,定性定量分析了中、美黄土的微观结构参数特征及其差异性,研究了中、美黄土的粒度组分和矿物成分差异,综合探讨了两地区的液化势差异。研究结果可为进一步揭示黄土高原地区和密西西比河流域的黄土液化特性和机理研究提供依据,为黄土地区的建设工程抗液化设计提供理论参考。

## 1 室内试验

### 1.1 试样

黄土高原地区试验所用原状黄土试样取自甘肃兰州、临夏、天水以及宁夏西吉 4 个场地。密西西比河流域原状黄土取自美国肯塔基州的 Hickman、Columbus、Wickliffe 和 Paducah 4 个场地,共计 8 组试样,均为  $Q_3$  黄土。

### 1.2 试验方法

微结构测试采用 KYKY-2800B 型扫描电子显微镜。试验前掰取试样的纵向新鲜断面,制备 2 mm 厚的方形薄片,用导电胶固定在试样托上,并对其表面进行喷金处理。试验时电压设置为 21 kV,各组试样均拍摄 10~12 张图像,放大倍数均选择 500 倍。

颗粒分析试验在马尔文激光粒度分析仪上进行。取 10~15 g 过筛后的风干土样置于烧杯内,添加一定量的分散剂,并用超声波分散后进行粒度对比分析,各

组试样均进行 4 个平行样,求平均值以消除误差。

采用 X'Pert PRO X 试验系统对不同地区的试样进行 X 射线衍射分析。试验前将试样冻干、过筛并充分研磨后,将试样粉末均匀涂抹在样品架凹槽中,放入仪器中进行测试,分析矿物成分差异。试验时采用 Cu 靶,管电压设置为 40 kV,管电流设置为 40 mA,衍射角  $2\theta$  为  $5^\circ \sim 75^\circ$ ,扫描速度为  $2^\circ/\text{min}$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 中、美黄土微结构特征参数特征及差异性

不同地区原状黄土试样的扫描电镜测试结果如图 1 所示。由图 1 可知,中国黄土高原地区和美国密西西比河流域的黄土微结构特征具有显著差异。根据图 1(a)~(d),中国黄土的微结构照片视野内可见中、大颗粒分布,土骨架结构清晰,颗粒堆积形成的架空孔隙明显可见。然而,受地域差异性的影响,LZ、LX 黄土的微结构和 XJ、TS 黄土的微结构也存在较为明显的差别;LZ 和 LX 黄土颗粒之间仅有少量团絮状胶结物,为典型的架空镶嵌结构,胶结性较弱,颗粒之间以点接触为主;而 XJ 和 TS 黄土颗粒之间团絮状和凝块状胶结

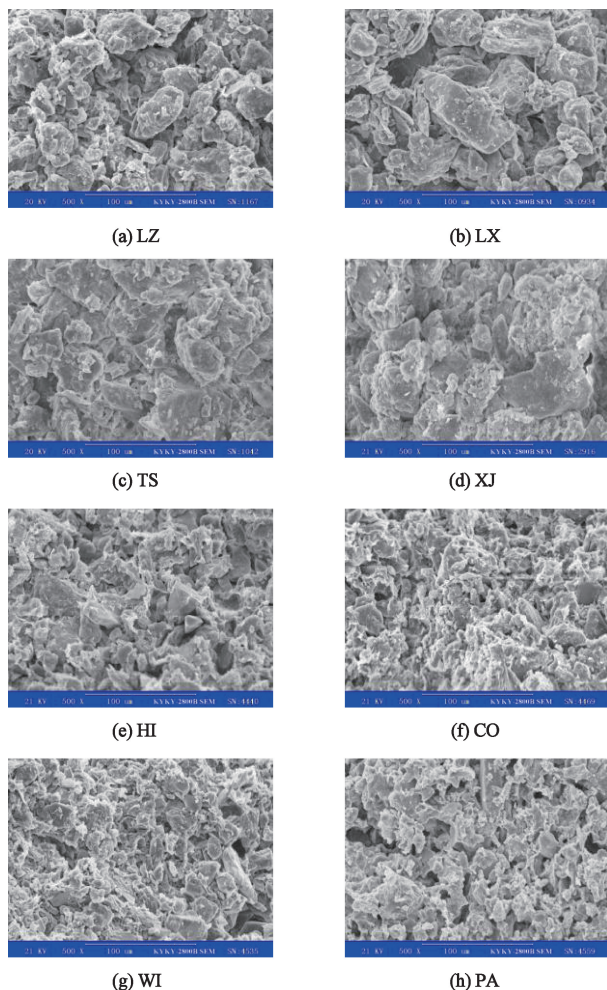


图1 不同地区原状黄土微结构照片

Fig. 1 SEM images of undisturbed loess in different regions



物较多,具有凝块胶结特征,胶结性较强,颗粒间接触方式为点接触和面接触共存。根据图 1(e)~(h),美国黄土的颗粒较为细小,且弥散分布;土骨架结构模糊,颗粒间的团絮状和凝块状胶结物明显较多,为典型的凝块胶结结构;颗粒间接触方式以面接触为主,且粒间的孔隙以小、微孔隙为主。

采用 PCAS 软件对中、美黄土的微结构参数进行统计<sup>[8]</sup>。图 2(a)为不同地区原状黄土孔隙率分布图,由图可知,中国黄土的孔隙率较大,其均值为 19.88%,而密西西比河流域黄土的孔隙率较小,其均值仅为 6.92%。说明美国密西西比黄土相比于中国黄土密度更高,架空孔隙更少,颗粒之间的咬合力与胶结性更强,使得土体结构更稳定。此外,通过计算得到中、美不同地区黄土孔隙率的标准差分别为 1.61 和 1.91,中国黄土的孔隙率差异性比美国黄土的孔隙率差异性略小。

图 2(b)为中、美不同地区原状黄土平均孔隙面积,由图可知,中国黄土的平均孔隙面积较大,其均值约为 310 像素,标准差 28.61,而密西西比黄土的平均孔隙面积均值为 220 像素,标准差为 17.45。相比而言,密西西比黄土的平均孔隙面积明显小于中国黄土,且不同地区黄土的平均孔隙面积差值更小。说明相比于中国黄土,密西西比黄土受河流沉积的影响,孔径相对较小,且不同地区黄土的孔径的差异性较小,颗粒分布更为均匀,从而使得其具有更高的结构强度。

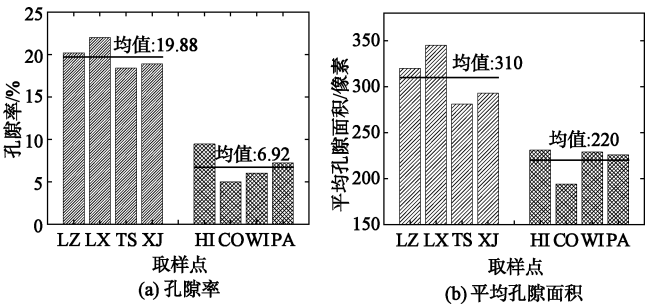


图 2 不同地区黄土的孔隙率和平均孔隙面积

Fig. 2 Porosity and average pore area of undisturbed loess in different regions

图 3 为中、美不同地区原状黄土的分形维数  $D_f$ ,由图可知,中国黄土的分形维数明显大于密西西比黄土的分形维数,说明中国黄土的孔隙复杂程度较高,颗粒排列紊乱,粒间接触不稳定,胶结强度弱,使得土体骨架容易产生变形。此外,中国黄土分形维数标准差为 0.026,约为美国黄土的 4 倍,说明中国黄土由区域差异性导致的孔隙复杂程度差异性更大。

2.2 中、美黄土的粒度差异性

为了探讨中、美黄土的粒度差异性,绘制不同地区原状黄土的颗粒分析曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,中、美黄土的粒径组成具有较明显的差异。美国黄土

的黏粒组分含量整体大于中国黄土,其原因主要在于两地区黄土形成的地层、地形、成因和物源存在差异。

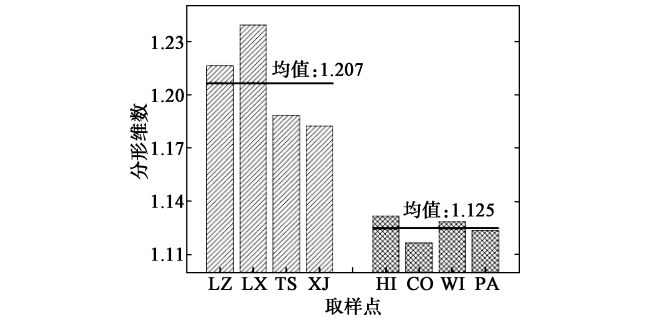


图 3 不同地区原状黄土分形维数

Fig. 3 Fractal dimension of loess in different regions

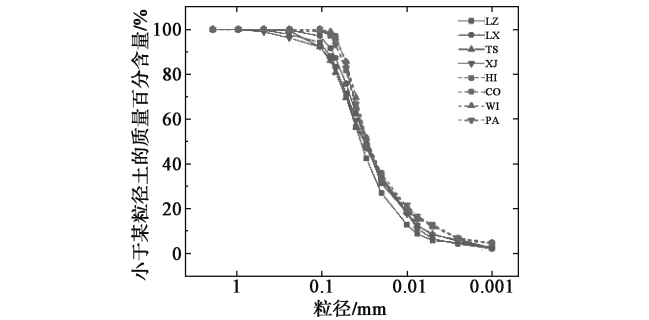


图 4 不同地区原状黄土的级配曲线

Fig. 4 Particle analysis of loess in different regions

图 5(a)为不同地区原状黄土不均匀系数。由图 5(a)可见,密西西比河黄土不均匀系数明显大于黄土高原黄土,其均值为 9.039,约为中国黄土的 1.5 倍,说明其均匀性更好。通过计算得到中、美不同场地黄土的不均匀系数标准差分别为 1.10 和 0.88,说明相比于中国黄土,美国不同地区黄土的均匀性差异较小。

中、美不同地区原状黄土曲率系数( $C_c$ )如图 5(b)所示。密西西比河地区曲率系数均值为 2.256,且不同地区黄土的  $C_c$  均在标准范围内,粒径齐全,工程性质良好。而中国黄土的  $C_c$  均值为 1.277,总体在标准范围内,但其中 LX 黄土  $C_c$  为 0.988,级配较差。分别计算中、美不同地区黄土  $C_c$  的标准差可得,中国黄土  $C_c$  的区域差异性比美国黄土略大。

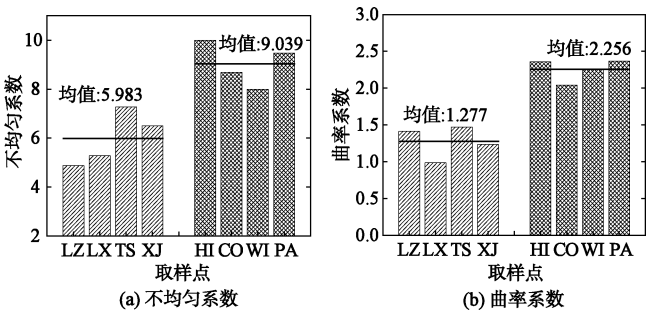


图 5 不同地区黄土的不均匀系数和曲率系数

Fig. 5 Coefficient of uniformity and curvature of undisturbed loess in different regions

2.3 中、美黄土的矿物成分差异性

为了分析中、美黄土的矿物成分差异,通过对中、美不同地区的黄土进行 X 射线衍射测试与分析,结果如图 6 所示。由图 6 可知,中、美不同地区黄土的 X 射线衍射图像形态总体相似,主要衍射峰值出现的位置基本相同,但衍射峰值的数量和强度差别较为明显,说明矿物成分存在一定的差异。相较于中国黄土,密西西比黄土的 X 射线衍射图像中无白云石( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )对应的衍射峰,其矿物成分以石英、钠长石、方解石和黏土矿物为主,且方解石( $\text{CaCO}_3$ )所对应的特征衍射峰明显减少,而以高岭石、蒙脱石为代表的黏土矿物所对应的特征衍射峰有明显增加。根据图 6,中国不同地区黄土的 X 射线衍射峰值和入射角基本相同,说明在黄土高原西部地区由于没有高大山脉的阻隔,风成黄土的矿物成分差异性较小,而区域干湿条件对黄土矿物成分的影响不明显;而美国黄土无论是入射角还是峰值强度均存在微小的差异性,且主要表现为钠长石和黏土矿物成分的差异,说明水流沉积对黄土矿物成分差异性的影响较为显著。

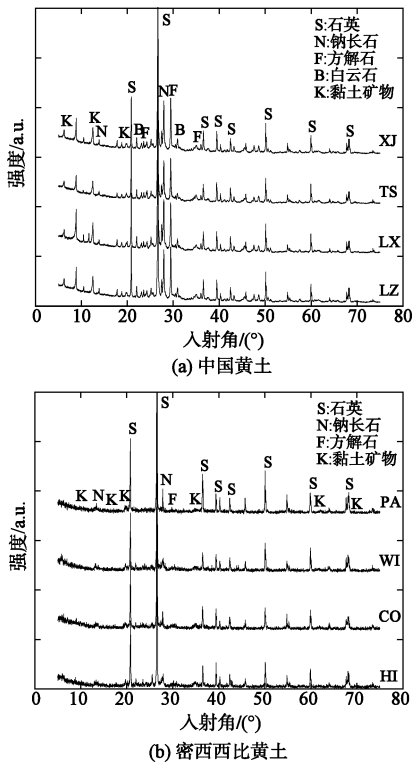


图6 不同地区原状黄土 X 射线衍射图像

Fig. 6 X-ray diffraction images of loess in different regions

2.4 中、美黄土液化特性与微观特征差异的关联性

为研究中、美黄土液化特性的差异性及其与微观特征差异的关联性,基于动三轴试验,得到中、美黄土的动应变和动孔隙水压力变化曲线,如图 7 所示。为保证试验结果的可对比性,试验中 LX 黄土的饱和、固结和循环剪切参数均参考文献[7]进行设置。

由图 7 可知,在相同加载条件下,LX 黄土的动应变迅速增长并很快达到破坏;而密西西比黄土的动应变幅值在初始阶段小于 1%,且增长稳定,当振次达到 28 次时增长速率加快,并在几个周期内破坏。根据图 7,动荷载作用下,LX 黄土的动孔隙水压力响应剧烈,增长速率较快,其最大动孔隙水压力比为 0.79;而密西西比黄土的动孔隙水压力增长具有急剧增长—缓慢增长—急剧增长的特征,其最大动孔隙水压力比达到 1.0。由图 7 还可知,密西西比黄土达到破坏的振次约为 LX 黄土的 9 倍,其在破坏时的动孔隙水压力比和最大动孔隙水压力比分别约为 LX 黄土的 1.55 倍和 1.27 倍。因此,相比于 LX 黄土,密西西比黄土的抗液化强度更大,孔隙水压力累积特征更为明显。

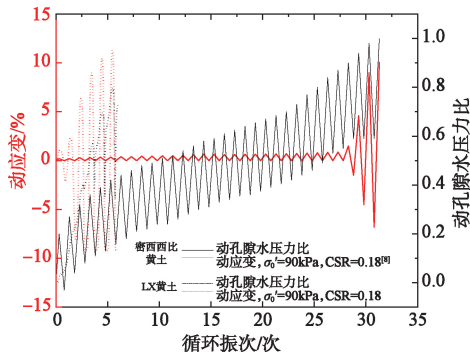


图7 中美黄土的液化特性对比

Fig. 7 Comparison of liquefaction behaviors of loess between China and the USA

黄土微观结构特征差异是导致其液化特性存在差别的主要原因。在饱和状态下,水分促使黄土颗粒间的可溶性盐溶解,结构强度降低,处于亚稳态,但颗粒间的胶结作用依然存在,而不同结构性原状黄土中的胶结物、孔隙结构和颗粒接触方式均存在差异,因此在动荷载作用下其液化时的变形特性有所差异。结合图 1 可知,中国黄土颗粒间的胶结物较少,孔隙类型以大中孔隙为主,颗粒间接触方式以点接触为主,动荷载作用下,土体结构会迅速破坏,架空孔隙崩塌和颗粒重排使得土体在宏观上表现为较大的残余变形;而随着孔隙的压缩,土体内的孔隙水压力上升,有效应力降低,造成土骨架强度的进一步降低,最终使土体产生液化破坏。而美国黄土颗粒间的胶结物较多,孔隙尺度远小于黄土高原黄土,颗粒间以面接触为主,其在动荷载作用下土体结构相对稳定,从而不仅可抵御动荷载作用造成的土骨架变形,还可抑制孔隙水压力的传递和发展;随着振动次数的增加,孔隙水压力不断累积,土骨架强度持续衰减,当其不足以抵御振动作用时,土体发生液化破坏。因此,从微观角度,中、美黄土微结构的差异决定其在循环动荷载作用下的动应变和孔隙水压力特征存在显著不同。

为了进一步说明土体微结构特征参数差异性对中、美黄土液化特性的影响,结合图 2~4 对 LX 黄土和密西西比黄土液化特性的差异性进行分析。研究表明,大、中孔隙是黄土液化的重要控制因素。根据图 2,相比于 LX 黄土,密西西比黄土的孔隙率和平均孔隙面积更小,土体更为密实,结构更加稳定,且由于颗粒间较多胶结物的存在,使得孔隙连通性变差,在同等动荷载和水力作用下,孔隙水压力响应较弱,并不易产生残余变形,从而使得其具有更高的抗液化强度。

孔隙分形维数与抗液化强度具有负相关关系。根据图 3,由于密西西比黄土的孔隙分形维数远低于 LX 黄土的孔隙分形维数,使得其抗液化强度更大。在相同动荷载作用下,由于其孔隙更为整齐且以小、微孔隙为主,结构更加稳定,使得颗粒之间较难发生错动,因而初始动应变较小;而 LX 黄土中、大孔隙含量较高,结构稳定性较差,孔隙较为复杂,使得其在动荷载作用的初始阶段就产生较大的残余变形并促使动孔隙水压力急剧增长,最终导致土体液化破坏。

根据图 5,相比于 LX 黄土,密西西比黄土具有更为优良的颗粒级配,使得其抗液化强度更大。此外,黄土中黏粒含量越高,其孔隙水压力增速及增幅越低,抗液化强度越高。根据图 4 统计得到中国黄土高原 LZ、LX、TS 和 XJ 黄土的黏粒含量分别为 5.68%、6.52%、8.68% 和 8.23%,均值为 7.28%;而美国密西西比流域 HI、CO、WI 和 PA 黄土的黏粒含量分别为 12.06%、12.83%、12.10% 和 12.68%,均值为 12.42%。可见,相比于中国黄土,密西西比黄土黏粒的含量明显较大,其均值约为中国黄土的 1.71 倍。结合图 1,黄土中的黏粒可附着在大颗粒上,增加土的比表面积,使土体的固水能力明显提高,可有效抑制孔隙水压力的增加;同时,黏粒可以通过电性相吸形成团絮状物质,充盈于大颗粒之间的孔隙之中,使土体内凝块状胶结物含量增加,增强了颗粒间的胶结强度和凝聚力,增加了土骨架的结构强度,提升了黄土抗液化能力。

结合图 6 中的 XRD 测试结果,美国黄土中的黏土矿物含量较多。由于黏土矿物多处于胶态或准胶态,有良好的胶结性、表面能和亲水性,在增强颗粒间的胶结强度的同时使土体的持水性明显增加,抑制孔隙水压力的发展。因此,相较于 LX 黄土,密西西比黄土的动应变和孔隙水压力增长较慢,且因结构强度减小缓慢,小、微孔隙有利于动孔隙水压力的累积,最终使土体在破坏时孔隙水压力更高,达到了“初始液化”。

### 3 结 论

通过研究主要得出以下结论:

(1) 中、美黄土的成因、物源、地层和地形等条件

不同,使得其微观特征存在明显的差异。美国黄土的更加密实、颗粒间胶结物更多,结构更加稳定。

(2) 相比于中国黄土,美国黄土的孔隙率、平均孔隙面积和分形维数均较小,土体中不含白云石,且黏土矿物含量较多,粒径级配更优,孔隙排列整齐,土骨架结构强度大,动力稳定性较为优良。

(3) 中、美黄土微观特征差异是导致其液化特性存在差别的内因。

**致谢:**感谢国家留学基金会资助笔者在美国的学习和研究工作。

### 参考文献:

- [1] 白铭学, 张苏民. 高烈度地震时黄土地层的液化移动[J]. 工程勘察, 1990, 18(6): 1-5. (BAI Ming-xue, ZHANG Su-min. Landslide induced by liquefaction of loessial soil during earthquake of high intensity [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1990, 18(6): 1-5. (in Chinese)).
- [2] NUTTLI O W. The Mississippi Valley earthquakes of 1811 and 1812: Intensities ground motion and magnitudes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1973, 63: 227-248.
- [3] PRAKASH S, PURI V K. Liquefaction of loessial soils[C]// Anon. Proc. of Third International Conference on Seismic Microzonation, Seattle, Wash, 1982: 1101-1107.
- [4] WOLF L W, COLLIER J, TUTTLE M, et al. Geophysical reconnaissance of earthquake-induced liquefaction features in the New Madrid seismic zone [J]. Journal of Applied Geophysics, 1998, 39(3): 121-129.
- [5] OWENS P R, RUTLEDGE E M, OSIER S C, et al. The relationship of soils containing liquefaction features and redoximorphic features to perched seasonal water tables in the Lower Mississippi River Valley [J]. Quaternary International, 2001, 78(1): 45-51.
- [6] WANG S Y, LUNA R, ONYEJEKWE S. Effect of initial consolidation condition on postcyclic undrained monotonic shear behavior of Mississippi river valley silt [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(2): 04015075.
- [7] HWANG H, WANG L M, YUAN Z. Comparison of liquefaction potential of loess in Lanzhou, China, and Memphis, USA [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20(5/6/7/8): 389-395.
- [8] LIU C, SHI B, ZHOU J, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: application on SEM images of clay materials [J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1): 97-106.

(编校:明经平)