

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.402>



强震区黄土结构演变与力学响应机制

刘 伟¹, 孙欣然¹, 何乃武²

1. 内蒙古大学交通学院, 内蒙古呼和浩特 010070

2. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100089

摘 要: 黄土因其遇水产生湿陷变形而对工程构筑物的安全性造成严重威胁. 强震区黄土遭遇先期地震后其内部结构将发生变化, 结构演变与黄土初始含水量密切相关. 先期地震对黄土的结构性破坏引起宏观力学特征变化, 为揭示强震区黄土结构演变与力学响应的内在机制, 基于动三轴对黄土试样预先施加不同 PGA (peak ground acceleration) 条件下动荷载进行预震处理, 模拟强震区先期地震对黄土的扰动, 后进行固结不排水试验, 分析抗剪强度指标与地震荷载及初始含水量的关联性. 试验结果表明, 初始含水率为 2% 时, 预先施加地震动荷载的黄土试样与未预先施加动荷载的试样相比, 其峰值强度出现了明显降低, 且随着预先施加动荷载 PGA 的增加, 峰值强度降幅增加. 孔隙水压力随应变的不断增加趋于平缓, 有效轴向应力和有效围压随应变的不断增加而持续减小, 最终趋于平缓; 初始含水量增加至 12%, 预震处理后的黄土试样强度增大. 通过绘制应力路径关系曲线, 确定了强震区黄土失稳的临界失稳线, 对于同一黄土试样, PGA 增加后引起黄土失稳线不断下移, 表明黄土中的应力状态随地震动荷载的增加而发生变化. 初始含水量为 12% 时, 预震后的黄土试样剪切强度增大, 表明含水量增加后, 前期地震荷载开始破坏黄土初始结构性, 导致试样密度增大, 产生强度增加效应.

关键词: 强震区; 黄土; 结构演变; 强度劣化; 临界失稳线; 岩土工程.

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2022)12-4442-14

收稿日期: 2022-06-30

Structural Evolution and Mechanical Response Mechanism of Loess in Strong Earthquake Area

Liu Wei¹, Sun Xinran¹, He Naiwu²

1. Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China

2. China Highway Engineering Consultants Corporation, Beijing 100089, China

Abstract: Loess poses a serious threat to the safety of engineering structures because of its collapsibility and deformation when it encounters water. The internal structure of loess in strong earthquake areas will change after encountering historical earthquakes, and the structural evolution is closely related to the initial water content of loess. Structural damage of loess by historical earthquakes also affects its macroscopic mechanical characteristics. In order to reveal the mechanism of the structural evolution and mechanical response of loess in strong earthquake areas, the loess samples were pre-seismically treated with dynamic loads under different PGA (peak ground acceleration) conditions via dynamic triaxial tests, so that the disturbance of historical earthquakes to loess was simulated. Afterwards, the undrained test was carried out to analyze the correlation between the shear strength parameters, the seismic load and initial water content. The test results show that when the initial moisture content is 2%, the peak

基金项目: 内蒙古自治区自然基金项目(No.2020BS04003); 国家重点研发计划项目(No.2019YFC1509700); 国家自然科学基金(No.42067066).

作者简介: 刘伟(1989-), 男, 讲师, 主要从事复杂环境下岩土体力学特性方面的研究工作. ORCID: 0000-0001-6347-7816. E-mail: liuwei@imu.edu.cn

引用格式: 刘伟, 孙欣然, 何乃武, 2022. 强震区黄土结构演变与力学响应机制. 地球科学, 47(12): 4442-4455.

Citation: Liu Wei, Sun Xinran, He Naiwu, 2022. Structural Evolution and Mechanical Response Mechanism of Loess in Strong Earthquake Area. *Earth Science*, 47(12): 4442-4455.

strength of the loess sample with pre-seismical treatment is significantly lower than that of the sample without pre-seismical treatment, and with the increase of PGA, the peak strength decreases. The pore water pressure eventually tends to be constant with the continuous increase of the strain, the effective axial stress and the effective confining pressure decrease with the continuously increasing strain, and finally tend to be content. When the initial water content increased to 12%, the strength of the loess sample after pre-seismical treatment increased. By drawing the stress path relationship curve, the critical instability line and failure line of the loess in the strong earthquake area are determined. For the same loess samples, the increase of PGA causes the loess instability line to move down continuously, indicating that the stress state in the loess changes with the increase of the earthquake dynamic load. When the initial moisture content is 12%, the shear strength of the loess sample after pre-seismic treatment increases.

Key words: strong earthquake area; loess; structural evolution; strength deterioration; critical instability line; geotechnical engineering.

0 引言

黄土是第四纪时期干旱半干旱气候环境下形成的孔隙发育、胶结结构较弱的沉积物,质地均匀,厚度大,内部垂直节理发育.我国黄土集中分布于甘肃、陕西、宁夏、山西和青海等省区,形成了著名的黄土高原(孙建中,2005;陈晋北等,2021).黄土高原区内沟壑纵横,地质构造复杂(闵隆瑞和范蕙,1988;朱照宇,1992),新构造活动强烈,地震频发,如1303年山西洪洞M8.0地震、1556年陕西华县M8.0地震、1718年通渭M7.5地震、1920年宁夏海原M8.5地震、2008年汶川M8.0地震、2013年甘肃岷县—漳县M6.6地震均导致宁夏和甘肃地区出现大量的地震滑坡、震陷和液化等黄土地震灾害(Sun *et al.*, 2017; Zhuang *et al.*, 2018; 崔圣华等, 2020; Zhuang *et al.*, 2020).

黄土微结构中的架空孔隙使其具有较大的压缩性,在受到特殊外力作用,如浸水或地震时,会发生塌陷或液化(Ma, L. N., *et al.*, 2022a; Ma, P. H., 2022b).由此可见,黄土特殊的结构演变是其致灾的根本原因,对其细微结构的研究有利于从本质上认识其宏观物理属性(张耀,2019).

公路工程地质勘察规范中指出,地震峰值加速度为0.1~0.4 g时应进行强震区工程勘察(中华人民共和国交通运输部,2011),即地震烈度等于或大于7度区为强震区(中华人民共和国住房和城乡建设部,2016).黄土经历多期次先期地震后可表现为直接液化,也可表现为在低含水量时不液化而引起黄土内部结构损伤.黄土结构损伤演化与力学性质变化密切相关(谢定义等,1999),地震对黄土的影响在微结构演化中能够得以充分体现,同时振动作用加速水分入渗(王家鼎等,2021).黄土微结构包括

颗粒接触方式和孔隙形态变化,内部骨架颗粒以架空和镶嵌两种方式排列(安亮等,2019),干湿交替的大陆性气候作用形成黄土独特的架空孔隙.黄土微结构在地震下产生结构变化,内部结构演化引起宏观上形成崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害(Pei *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2020a; Wu *et al.*, 2020),黄土内部微结构演化及其与地震的联系是认识地震诱发上述地质灾害的重要途径.

早期地震作用将引起饱和和低塑性粉土直接液化,液化后粉土在自重应力作用下固结,上覆荷载变化时,固结应力比不同,将形成不同的新结构,该结构对低塑性粉土后期再次经历地震时的响应将产生重要影响(Gao, 1996; Jiang *et al.*, 2014).地震作用下土体液化特征及影响因素方面,学者们基于砂土液化前初始相对密度、粉粒含量、循环荷载幅值和围压等因素进行液化特征分析,黄土液化则与饱和度、超固结比及动荷载幅值(Liu *et al.*, 2020b)等因素密切相关.目前对砂土和粉质黏土液化特征的研究中,部分学者考虑了先期地震及首次液化后固结比对后期液化的影响.砂土液化后的密度与液化前相比明显增加,首次液化后的砂土后期经历地震依然会发生液化,基于动三轴试验对砂土液化后的二次液化现象进行研究,发现首次液化的动应力幅值以及二次液化前的固结比等都对二次液化影响较大(Yasuda and Tohno, 1988; Yasuda *et al.*, 2012; Toyota and Takada, 2017).密西西比河低塑性粉土在动荷载作用下液化后,其结构及压缩性等均发生了变化,此时对试样基于不同的固结比进行再次固结,对固结后的试样施加动荷载,试样二次液化,液化后压缩系数减小(Wang *et al.*, 2015a, 2016),并基于膨润土对粉土进行改良后观察其液化及液化后的静力学特征,黏粒含量减缓了超孔压

的上升速率(Wang *et al.*, 2013, 2015b). 上述试验均基于饱和砂土或饱和粉土进行动液化试验, 后通过固结进行二次液化试验或静力学试验, 对于试样在非饱和状态经历地震荷载扰动后, 后期的力学特征未进行研究. 然而, 黄土高原主要区域均处于干旱半干旱区(毛永栋等, 2021), 且地震频发, 大多黄土的天然含水量远远低于饱和含水量, 降雨后黄土饱和度增大, 但均处于非饱和状态, 非饱和黄土经历先期地震影响后, 不发生液化, 但内部结构被改变, 即早期地震对后期力学行为产生影响. 因而当前黄土场地破坏时的失稳破坏特征, 须考虑场地内黄土遭遇过的地震扰动历史, 故利用“预震”模拟先期地震, 是揭示当前黄土失稳破坏特征的有效技术手段.

地震动荷载作用下黄土失稳破坏方面的研究相对较多, 但缺乏考虑先期地震、降雨、地震与降雨耦合作用等因素的影响. 周期性降雨及先期地震是黄土高原区诱发黄土结构性变化的重要因素, 因此考虑早期降雨与地震耦合作用下结构演化模式及其规律性有利于更加深入地理解结构演化后黄土失稳破坏特征, 可为揭示强震区黄土结构演变与力学响应机制的内在关联性提供重要的理论支撑.

1 室内试验

1.1 试样

试验中所用黄土均取自甘肃定西市通渭县, 现场开挖断面后人工取样, 原始取样深度为 3.0 m(图 1). 在人工断面的侧壁上采取原状试样, 该处的黄土较为均匀, 试样中不含植物根系, 大孔隙较为发育, 无虫孔及根孔, 钙质结核相对较多. 由于取样前该区有降雨, 在将表层扰动土剔除后对新鲜剖面上试样进行取备, 室内测试发现完全不受雨水影响的黄土试样的含水量为 1.82%~2.66%, 而降雨入渗影响的试样含水量达到 11.67%~12.48%, 取含水量均值后设定含水量为 2% 和 12%. 原状样现场制取成直径为 5.0~7.0 cm, 高度为 10.0~12.0 cm 的圆柱状, 所有试样密封保存. 室内通过切土盘进行三轴试验原状样削制, 试样尺寸为 50 mm×100 mm. 室内测试黄土密度为 1.49~1.52 g/cm³ 和 1.63~1.65 g/cm³, 测试中选择含水量和密度相对均匀的试样进行试验, 剔除含水量与密度差异性较大试样, 试样物理力学参数见表 1.

1.2 试验设备与方法

试验在 DTX-1 型动三轴上进行. DTX-1 型动

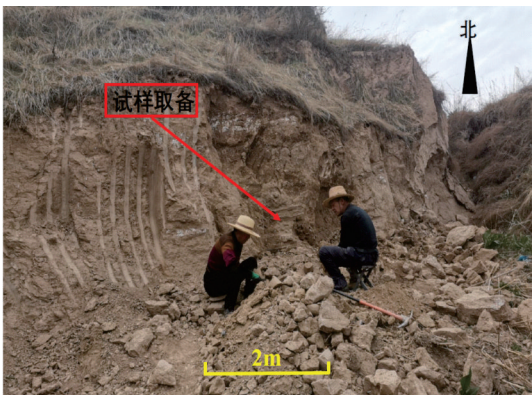


图 1 试样取备

Fig.1 Sample preparation

表 1 试样物理力学参数汇总表

Table 1 Summary of physical and mechanical parameters of the samples

参数	初始含水量	初始含水量
	2% 试样	12% 试样
初始密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.49~1.52	1.63~1.65
实测含水量 $w(\%)$	1.82~2.66	11.67~12.48
液限 $w_L(\%)$	27.05	27.05
塑限 $w_p(\%)$	16.35	16.35
塑性指数 I_p	10.70	10.70
地震峰值 加速度(g)	0.20	0.20
比重	2.72	2.72
孔隙比	0.79~0.83	0.65~0.67
饱和度(%)	6.27~8.72	48.83~50.67

三轴是由南京中之岩测控技术有限公司生产的一种全自动控制三轴剪切试验系统. 该系统由反压系统、孔压系统、轴向加载系统和围压系统组成, 可通过程序化控制进行轴向动荷载施加、围压动荷载施加, 为确保整个动荷载施加过程中, 试样顶帽不脱开采用吸力帽的形式进行柔性连接, 提高了测试中试验结果的可靠性.

试验开始前, 需对设备进行排气和清零操作, 将准备好的黄土试样安装在 DTX-1 型三轴仪上, 准备开始预震试验. 试验前先对试样进行固结, 待试样的变形稳定后开始施加预震荷载, 预震荷载根据 PGA(peak ground acceleration)=0.15 g、0.30 g 和 0.40 g 进行施加, 预震结束后对试样进行固结不排水试验, 测试不同先期地震荷载扰动后黄土孔隙水压力、偏应力的变化规律. 预震荷载 0.15 g、0.30 g 和 0.40 g 的选择主要根据 7 度强、8 度强和 9 度地震烈

度进行确定,公路工程地质勘察规范中指出,地震峰值加速度为 0.1~0.4 g 时应进行强震区工程勘察(中华人民共和国交通运输部,2011),即地震加速度等于或大于 7 度区为强震区(中华人民共和国住房和城乡建设部,2016).结合取样场地通渭的地震峰值加速度为 0.20 g 及强震区典型特征,最终选定 PGA 为 0.15 g、0.30 g 和 0.40 g,地震加速度与烈度换算关系见表 2.文中施加的动荷载根据地震加速度与动应力的关系进行施加,动荷载波形为 1 Hz 正弦波荷载,动荷载的时间主要通过不同烈度地震产生的破坏效应进行考虑,7 度考虑为预震 12 次,8 度预震 20 次,9 度预震 30 次(程国勇,2003).

预震中动荷载施加根据(Liu *et al.*, 2020b)采用的地震加速度与动应力等效方法进行荷载施加.试验加载使用的是 1 Hz 的正弦波荷载,预震施加次数如表 2 所示.试样固结时的轴向荷载为 48 kPa,固结时周围压力为 28.32 kPa,偏应力($\sigma_1-\sigma_3$)为 19.68 kPa.以偏压固结偏应力($\sigma_1-\sigma_3$)=19.68 kPa 为基点进行施加.各级预震荷载对应下的动应力和动剪应力如表 3 所示.初始含水量 2% 和 12% 的土样施加 0.15 g 动荷载时动应力应变曲线如图 2 和图 3 所示(此处仅选取 0.15 g 动荷载作用下的动应力应变曲线作为代表示例).初始含水量 2% 和 12% 的土样地震预处理前后的干密度、孔隙比、饱和度见表 4.

将预震后的原状样静置 48 h 以上,确保试样变形稳定.将静置后的试样依次进行水头饱和、反压

表 2 抗震设防烈度与设计基本地震加速度值和预震次数的对应关系

Table 2 Correspondence between seismic fortification intensity and design basic seismic acceleration value and pre-dynamic times

抗震设防烈度	6 度	7 度	8 度	9 度
设计基本地震加速度值(g)	0.05	0.10(0.15)	0.20(0.30)	0.40
预震次数	—	12	20	30

表 3 各预震荷载对应下的动应力及动剪应力
Table 3 Dynamic stress and dynamic shear stress corresponding to each pre-dynamic loadin

PGA(g)	0.15	0.30	0.40
T_d (kPa)	4.56	9.13	12.17
σ_d (kPa)	9.12	18.26	24.34

注:据王谦等(2015).

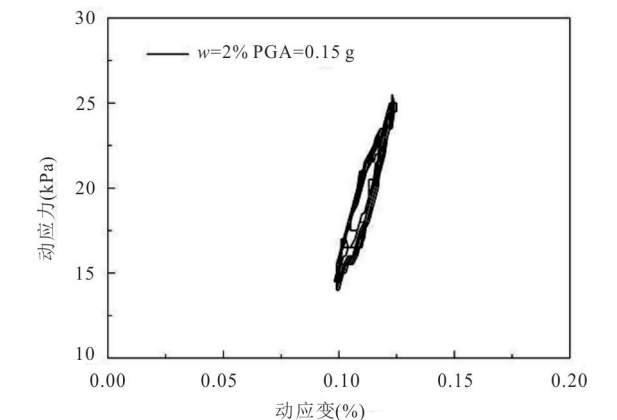


图 2 初始含水量 2% 土样的动应力应变曲线
Fig.2 Dynamic stress strain curve of soil sample with initial moisture content of 2%

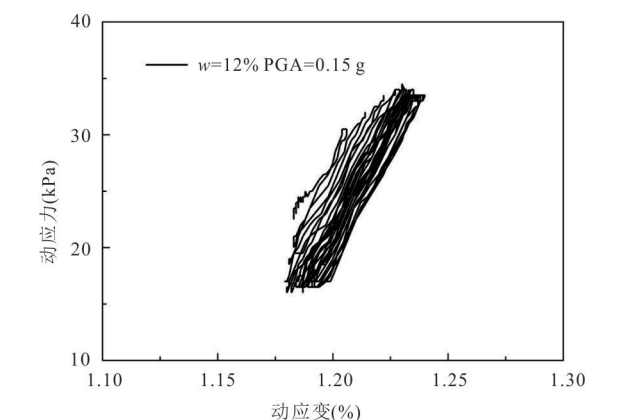


图 3 初始含水量 12% 土样的动应力应变曲线
Fig.3 Dynamic stress strain curve of soil sample with initial moisture content of 12%

表 4 预震处理前后干密度、孔隙比、饱和度对比
Table 4 Comparison of dry density, pore ratio and saturation before and after pre-dynamic treatment

初始含水量	2%	12%
预震前干密度(g/cm ³)	1.49~1.52	1.63~1.65
预震后干密度(g/cm ³)	1.492~1.522	1.65~1.67
预震前孔隙比	0.79~0.83	0.65~0.67
预震后孔隙比	0.78~0.82	0.64~0.66
预震前饱和度(%)	6.27~8.72	48.83~50.67
预震后饱和度(%)	6.28~8.73	49.45~51.31

饱和后进行饱和度检测,待 B 值达到 0.95 以上则进行固结试验,单位时间内排水量稳定后进行不排水剪切,设定加载速率为 0.05 mm/min.测试含水量是在测试 20 个试样基础上所得的平均值,试验中选择均匀性较好的试样,设定均值含水量为 2% 和 12%,

两种含水量的选定是经调研结合现场测试后确定. 取样剖面试样天然含水量在 2% 附近, 降雨后同层黄土含水量增加至 12% 附近, 故选用上述两个含水量试样进行测试分析.

2 结果分析

2.1 初始含水量 2% 黄土试验结果分析

利用动三轴对黄土原状试样进行模拟先期地震震预处理, 对预处理的黄土试样进行固结不排水三轴试验. 对比模拟地震预处理后与未处理试样试验结果可知, 随着预震荷载的增大, 初始含水量为 2% 的黄土试样峰值强度降低.

初始含水量 2% 时, 进行不同预震处理后黄土试样的应力应变关系结果见图 4, 各试样的应力应变曲线在应变 0~2.5% 范围内迅速增长至峰值. 不同先期地震处理后黄土试样偏应力随应变的增大而快速增长至峰值, 后缓慢降低, 表现出典型的应

变软化特征. 同时黄土试样的峰值偏应力随围压增大而增大, 而黄土试样的峰值偏应力随 PGA 的增加则不断降低. 围压增大使黄土试样结构更加致密进而引起偏应力增大. 初始含水量 2% 黄土试样预震后轴向变形为 0.012%~0.116%, 较小的轴向变形表明低含水量下黄土试样的轴向压缩极小, 不同地震加速度下的偏应力峰值汇总见表 5 所示.

初始含水量 2% 黄土试样在不同预震下的应力路径如图 5 所示, 由图 5 可知随着地震荷载的增大, 应力路径曲线峰值呈现降低的趋势, 表明预震处理

表 5 初始含水量 2% 黄土试样偏应力峰值汇总
Table 5 Summary of peak deviatoric stress of loess samples with initial moisture content of 2%

PGA(g)	100(kPa)	150(kPa)	200(kPa)
0.00	70.00	81.31	89.36
0.15	68.04	76.59	85.82
0.30	62.95	72.09	82.96
0.40	53.86	63.00	75.96

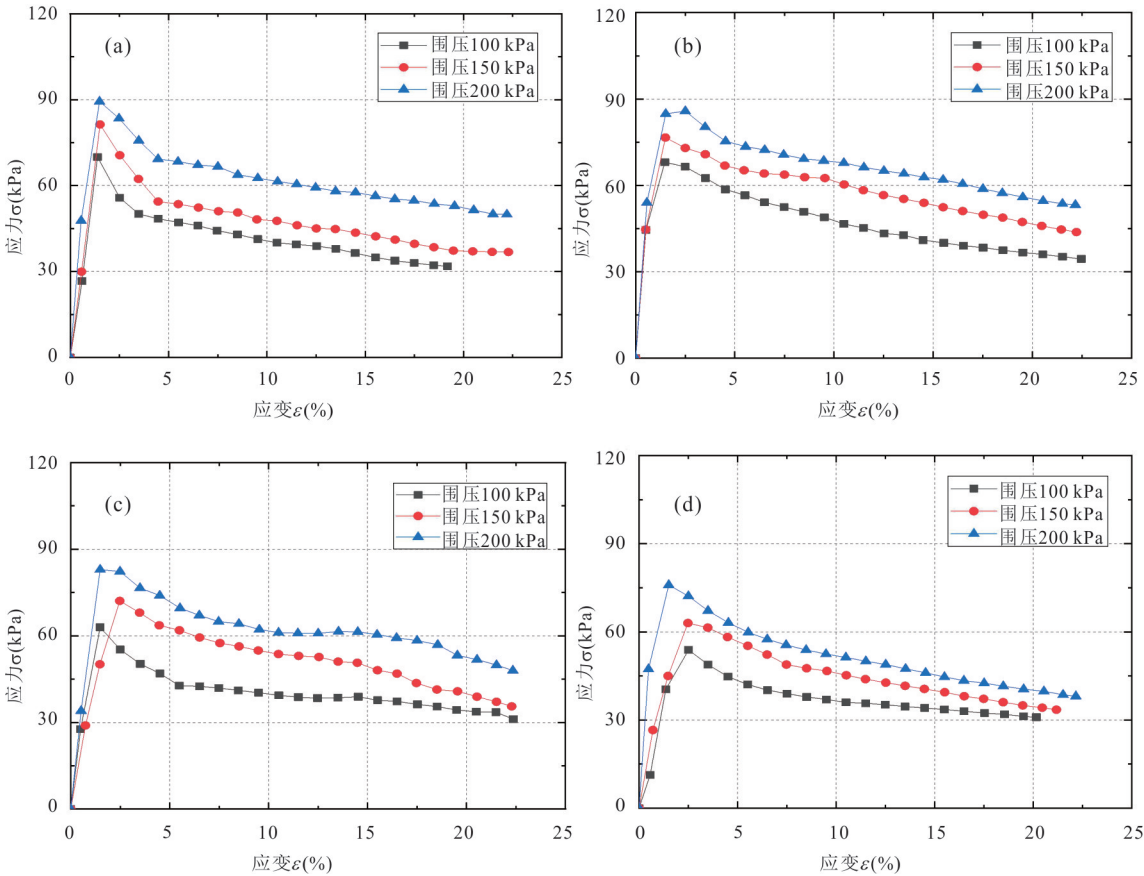


图 4 初始含水量 2% 黄土试样应力应变关系
Fig.4 Stress-strain relationship of loess sample with initial water content of 2%
a.PGA=0.00 g;b.PGA=0.15 g;c.PGA=0.30 g;d.PGA=0.40 g

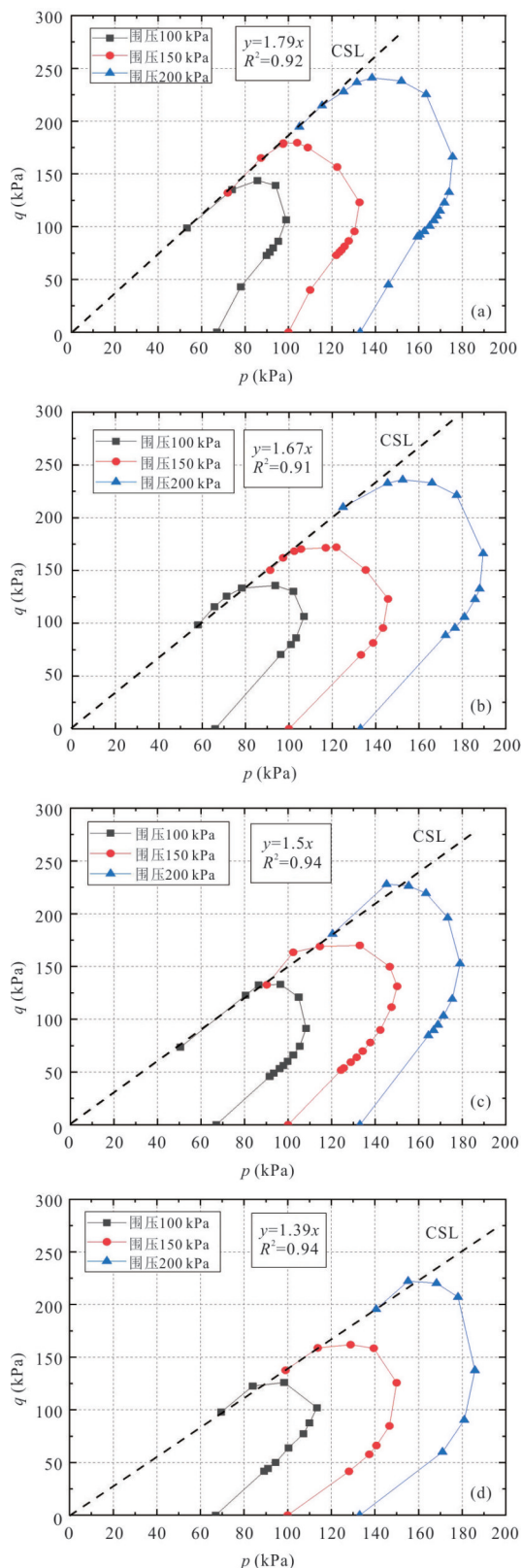


图5 初始含水量2%黄土试样有效应力路径

Fig.5 Effective stress path of loess sample with initial water content of 2%

a.PGA=0.00 g;b.PGA=0.15 g;c.PGA=0.30 g;d.PGA=0.40 g

表6 初始含水量2%的CSL临界失稳线斜率

Table 6 Slope of CSL critical instability line with initial water content of 2%

试样	临界失稳线的斜率K
PGA=0.00 g	1.79
PGA=0.15 g	1.67
PGA=0.30 g	1.50
PGA=0.40 g	1.39

表7 初始含水量2%黄土试样孔隙水压力稳定值汇总

Table 7 Summary of stable values of pore water pressure of loess sample with initial water content of 2%

PGA(g)	100 (kPa)	150 (kPa)	200 (kPa)
0.00	83.89	125.24	176.82
0.15	88.01	128.52	180.30
0.30	90.23	133.41	185.64
0.40	93.20	138.65	190.43

表8 初始含水量12%黄土试样偏应力峰值汇总

Table 8 Summary of peak deviatoric stress of loess samples with 12% initial water content

PGA(g)	100(kPa)	150(kPa)	200(kPa)
0.15	87.91	114.74	134.48
0.30	92.79	119.38	140.02
0.40	105.05	125.99	150.74

破坏了2%初始含水量的黄土的内部结构,震动引起黄土试样内部结构破坏,强度降低。

土体临界状态在有效应力路径图5中可表示为CSL临界失稳线。由表6可知,2%含水量的黄土试样随地震荷载的增大,其CSL临界失稳线的斜率减小,地震荷载越大,黄土强度越容易接近临界破坏值,土体越易失稳破坏。这也证实了先期地震引起低含水量黄土试样内部震损,强度降低,易失稳破坏。

初始含水量2%黄土试样在不同预震荷载下的孔压—应变曲线如图6所示,孔隙水压力在应变0~5%范围内迅速增大,上升至一定值后保持稳定。预震荷载增大,孔隙水压力升高,预震引起初始含水量为2%的黄土试样孔隙连通性增强,轴向应力增加的过程中孔隙水压力不断积聚,宏观上表现为孔隙水压力升高。不同地震加速度下的孔隙水压力稳定值汇总见表7所示。

2.2 初始含水量12%黄土试验结果分析

初始含水量12%黄土试样经不同先期地震模

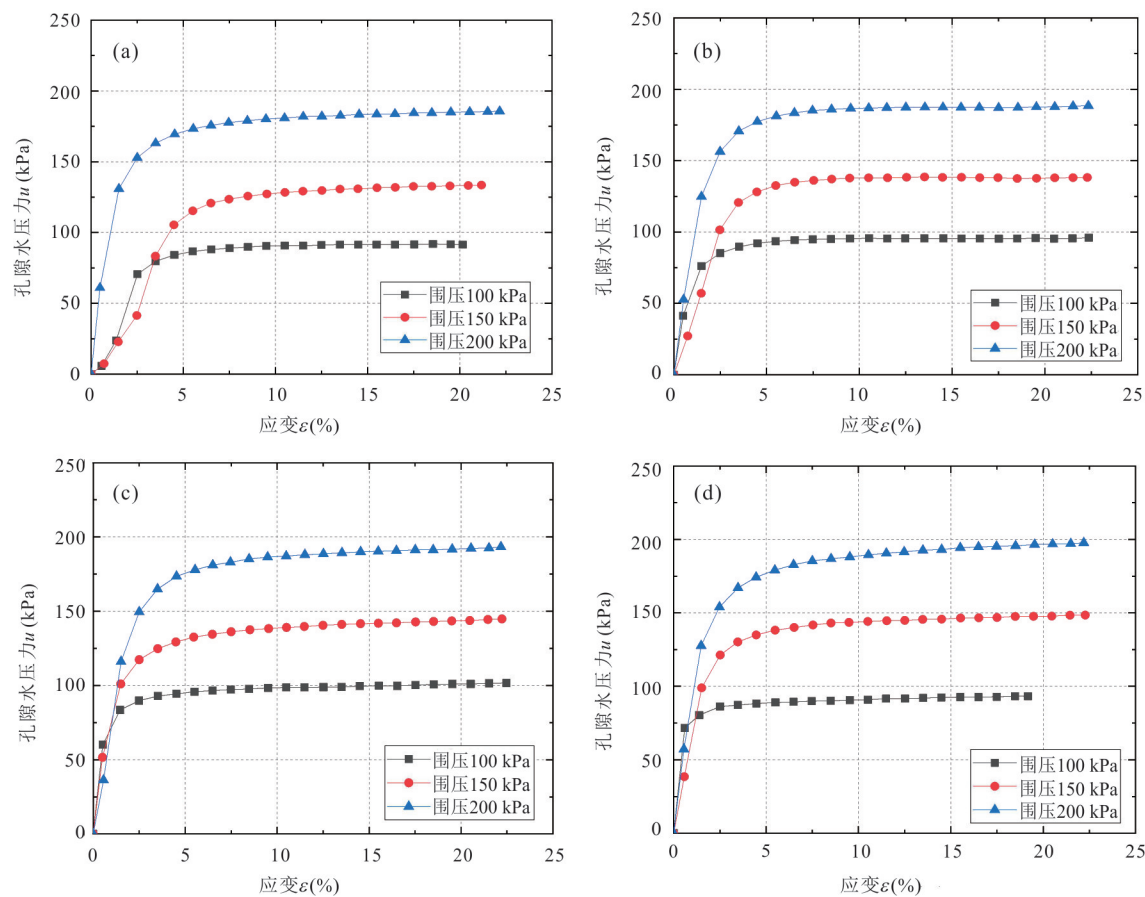


图6 初始含水量2%黄土试样孔压应变关系曲线
Fig.6 Pore water pressure strain relation curve of loess sample with initial water content of 2%
a.PGA=0.00 g;b.PGA=0.15 g;c.PGA=0.30 g;d.PGA=0.40 g

拟处理后的固结不排水剪切试验结果如图7~图9. 初始含水量12%的黄土试样经预震处理后,其偏应力随着地震荷载的增加而增大,表明含水量增大后试样被震密,内部结构更加致密.随着地震荷载的增大,偏应力峰值逐渐变大,表明黄土试样含水量变大后,地震荷载的增加对试样的震密作用增强,宏观上表现为强度明显提高,故而在图中表现为峰值偏应力随地震荷载增大而明显增加.此外,相同动荷载作用下,围压越大,峰值偏应力越大,表明其他条件相同时,围压荷载也会使得试样结构更加致密,引起强度升高.初始含水量12%的黄土试样预震后不排水剪切偏应力峰值汇总表8.

初始含水量12%黄土试样在不同预震作用下的有效应力路径如图8所示,随着地震荷载的增加,应力路径曲线峰值呈现增长的趋势,表明初始含水量增大到12%使黄土内部结构调整以压缩为主,地震荷载的增大,使黄土试样压密,土体更加致密,内部结构由于含水量的增大和地震的双重作用变得

更加稳定,强度增大.

由表9可知,当黄土试样的初始含水量增加至12%时,随着地震荷载的增大,CSL临界失稳线的斜率也逐渐增大.这表明地震荷载越大,12%含水量的黄土试样的应力峰值越大,强度越不易接近临界破坏值,土体越不易失稳破坏.证实了震动荷载使得高含水量黄土试样强度提高.

初始含水量12%黄土试样在不同预震作用下的孔压应变曲线如图9所示,孔隙水压力随应变的增加先快速增长,然后在应变5%附近缓慢增长,最后逐渐保持稳定.地震荷载的增大,孔压应变曲线的峰值呈现降低的趋势,表明含水量增大后,地震荷载的增大会使得孔隙水压力减小.初始含水量12%黄土试样预震后轴向变形为0.165%~1.252%.

与前述初始含水量2%黄土试样相比,高含水量试样,随地震荷载增大,土体轴向压缩量明显,促使土体内部土颗粒之间的胶结达到一种新的平衡

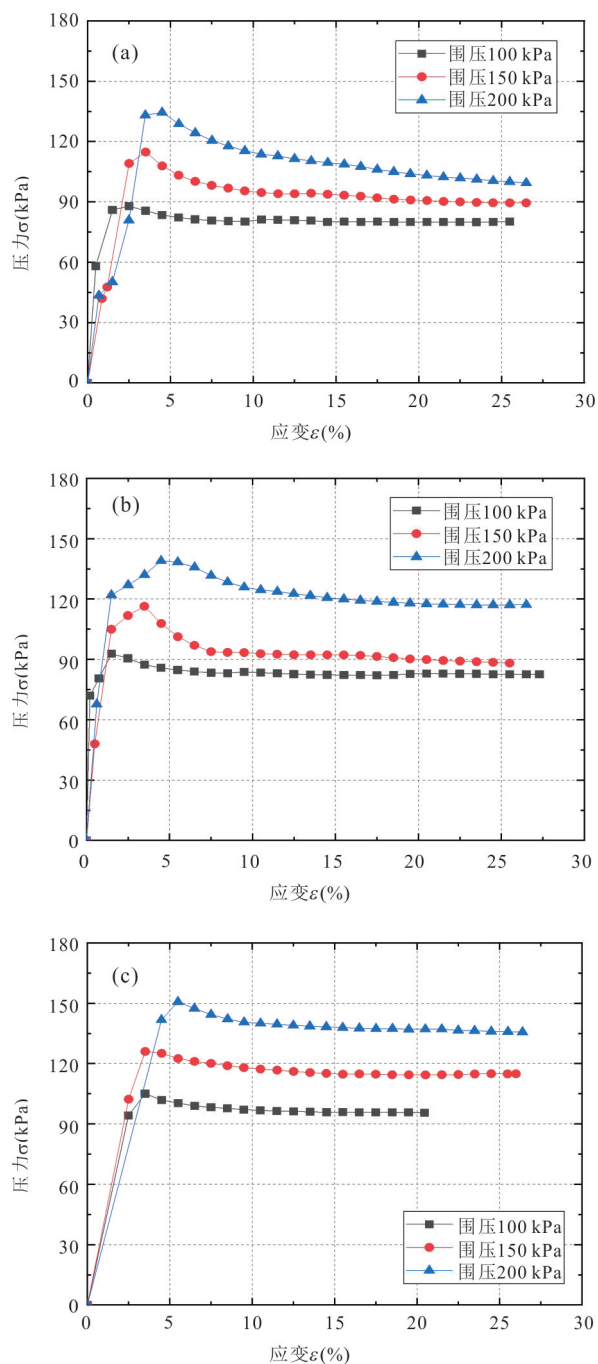


图7 初始含水量 12% 黄土试样应力应变关系

Fig.7 Stress-strain relationship of loess sample with initial moisture content of 12%

a.PGA=0.15 g;b.PGA=0.30 g;c.PGA=0.40 g

状态,结构稳定性增强,大孔隙向中小孔隙转变,内部孔隙结构的连通性变差,剪切过程中引起孔隙水压力升高.不同地震加速度下的孔隙水压力稳定值汇总如表 10 所示.

2.3 初始含水量 2% 和 12% 试验结果分析

两种含水量黄土试样的抗剪强度结果如表 11

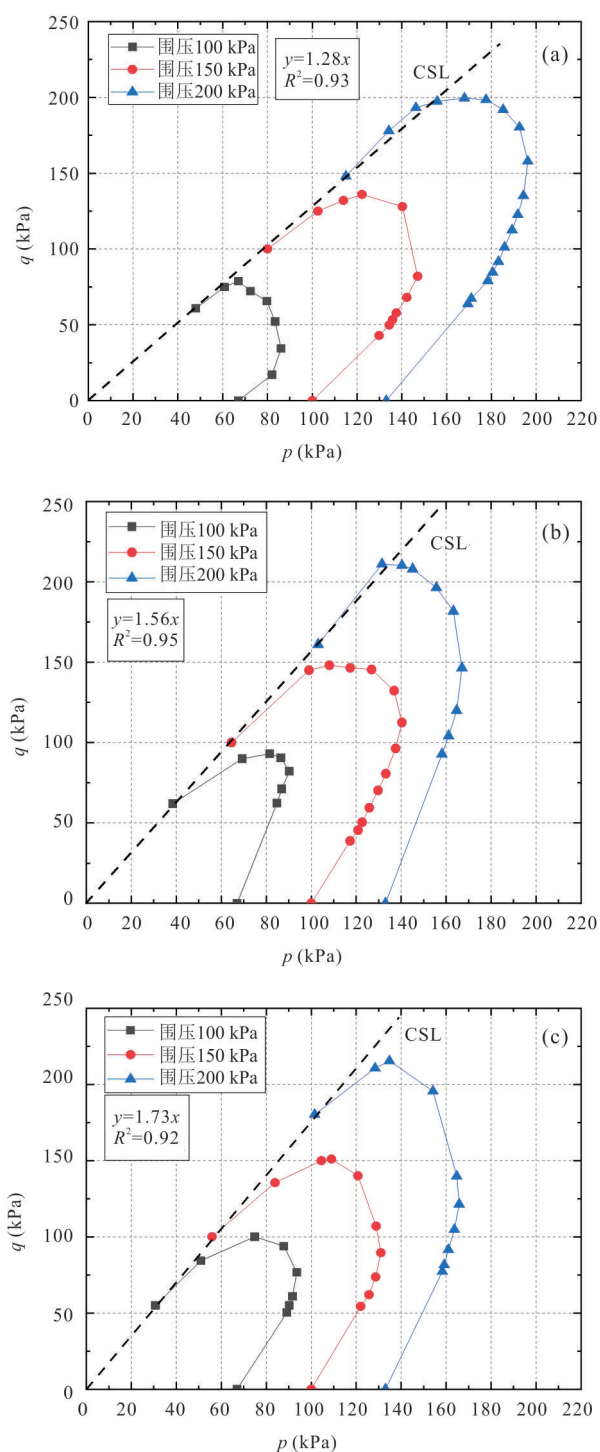


图8 初始含水量 12% 黄土试样有效应力路径

Fig.8 Effective stress path of loess sample with initial moisture content of 12%

a.PGA=0.15 g;b.PGA=0.30 g;c.PGA=0.40 g

所示.随着地震加速度的增加,初始含水量 2% 土样的内摩擦角逐渐减小,黏聚力也逐渐减小;而初始含水量 12% 土样的内摩擦角和黏聚力均逐渐增大.表明先期地震作用会使低含水量土体的内摩擦角

表 9 初始含水量 12% 的 CSL 临界失稳线斜率
Table 9 Slope of CSL critical instability line with initial water content of 12%

试样	临界失稳线的斜率 K
PGA=0.15 g	1.28
PGA=0.30 g	1.56
PGA=0.40 g	1.73

表 10 初始含水量 12% 黄土试样孔隙水压力稳定值汇总
Table 10 Summary of stable values of pore water pressure of loess sample with initial water content of 12%

PGA(g)	100(kPa)	150(kPa)	200(kPa)
0.15	88.50	146.29	192.88
0.30	80.84	139.91	187.63
0.40	77.78	128.58	178.73

和黏聚力减小. 先期地震作用会使高含水量土体内摩擦角和黏聚力均增大, 即抗剪强度升高.

本文作者在研究饱和黄土力学特征中, 发现不同初始含水量的黄土试样力学特征存在差异性, 而初始含水量不同对后期饱和度产生重要影响, 即饱和度对后期力学特性产生影响 (谔文武等, 2019). 随着地震荷载的增大, 初始含水量 2% 的黄土试样受到先期地震影响后, 土体间胶结变弱, 试样内部结构受到破坏, 偏应力峰值降低, 孔隙水压力峰值升高, 土样抗剪强度减弱, 土体整体稳定性减弱; 与之相反, 随着地震荷载的增大, 初始含水量 12% 的黄土试样受到地震荷载增大和含水量增加的双重影响后, 土颗粒间胶结形成了一种新的平衡方式, 试样内部由于震动作用变得更加致密, 结构难以破坏, 偏应力峰值升高, 孔隙水压力峰值下降, 土样抗剪强度升高, 土体整体稳定性增强.

含水量低的原状黄土在遭受预震后, 土体结构会变得更加松散, 难以维持原有稳定状态, 强度会明显下降; 而含水量较高的原状黄土在遭受预震后, 由于水与土颗粒之间的相互作用会使得土体在受到震动后变得更加致密, 土体由脆性变为塑性, 稳定性得到提升, 强度明显提升. 故而对地震频发的黄土地区可考虑通过控制土体含水量来控制土体的强度, 即充分利用原状黄土自身的结构强度维持上部工程构筑物的稳定性.

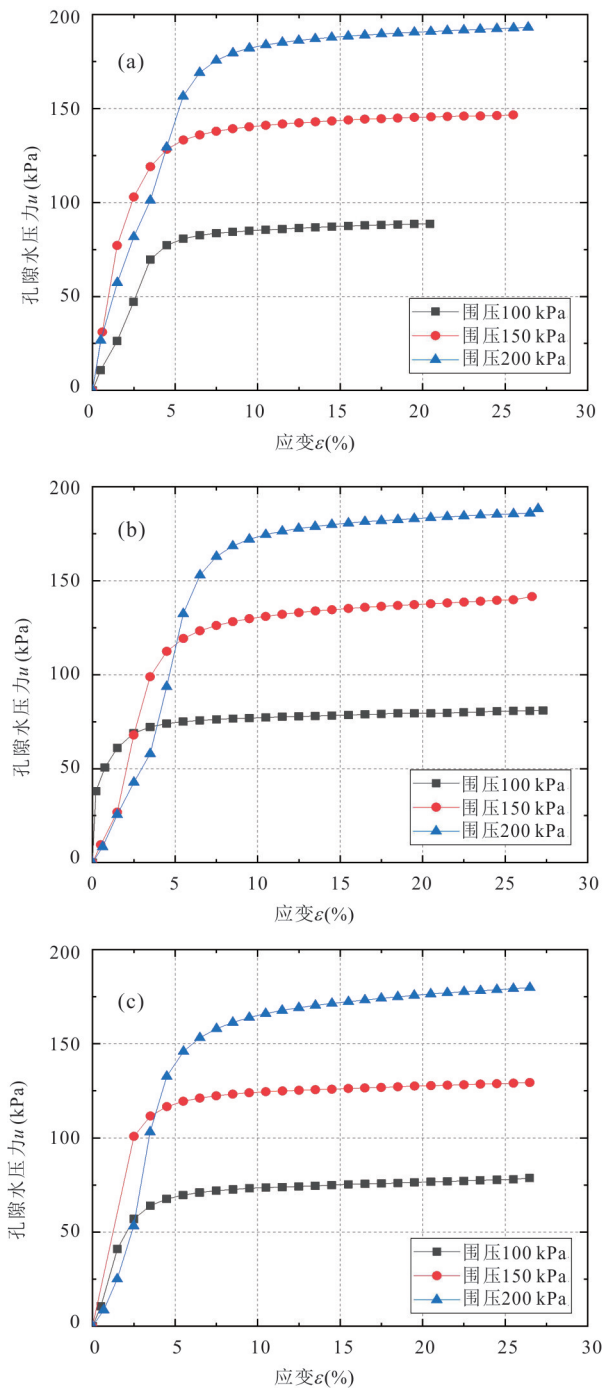


图 9 初始含水量 12% 黄土试样孔压应变关系
Fig.9 Pore water pressure strain relation diagrams of loess sample with initial water content of 12%
a.PGA=0.15 g;b.PGA=0.30 g;c.PGA=0.40 g

3 讨论

黄土中颗粒之间的接触以点接触为主 (Gao, 1981, 1996), 颗粒之间直接接触, 接触面很小, 除包裹在颗粒外部的黏土膜、盐晶膜或表面的风化皮之外, 只有极少的盐晶和黏胶微粒附着在接触位置.

表 11 初始含水量 2% 和 12% 土样抗剪强度
Table 11 Shear strength of soil samples with initial water content of 2% and 12%

	PGA(g)	内摩擦角 $c(^{\circ})$	黏聚力 $\varphi(\text{kPa})$
初始含水量 2% 试样	0.00	18.64	18.22
	0.15	17.16	16.74
	0.30	14.86	13.85
	0.40	12.32	10.53
初始含水量 12% 试样	0.15	18.98	20.35
	0.30	19.86	23.72
	0.40	24.27	25.11

黄土中的连接强度主要由接触造成的原始凝聚力
和盐晶胶膜造成的加固凝聚力所合成. 由于接触面
积过小, 单位土系中相同连接点的平均应力远比接
触面积大者集中, 浸水后部分盐晶迅速溶解, 总强
度被削弱, 留存较小的残余强度. 与此种特殊接触
方式对应的黄土中的架空孔隙是黄土湿陷和压缩

变形的重要内因. 由图 10 可知, 原状黄土中大孔隙
较多, 黄土试样孔隙结构相对较完整, 孔隙之间的
胶结结构较完整, 大孔隙较为发育. 模拟先期地震
处理后, 黄土试样由于含水量较低, 内部连接类似
刚性连接, 地震影响下直接破坏, 出现相邻的大孔
隙结构开始连通, 地震荷载进一步增大后出现震损
带. 当 PGA 为 0.15 g 时, 试样中出现部分大孔隙连
通现象, 大孔隙的连通改变了黄土的原生结构, 引
起黄土力学、水理、湿陷等性质均发生变化. 当 PGA
增加至 0.30 g 时, 预震引起黄土内部出现震损带, 主
要由于胶结结构被震裂形成, 震裂区同样是黄土试
样在震动荷载作用下形成的一种震损现象. 当 PGA
为 0.40 g 时, 黄土试样内部出现更多震损带, 且震
裂带开始彼此贯通, 黄土整体内部孔隙的连通性大
大增强. 低含水量黄土中逐渐出现的大孔隙连通、震
损带、贯通震裂带等现象, 在宏观上表现为土体强
度劣化. 此结果与前期研究有良好的对应 (Liu
et al., 2020a; 刘伟等, 2021).

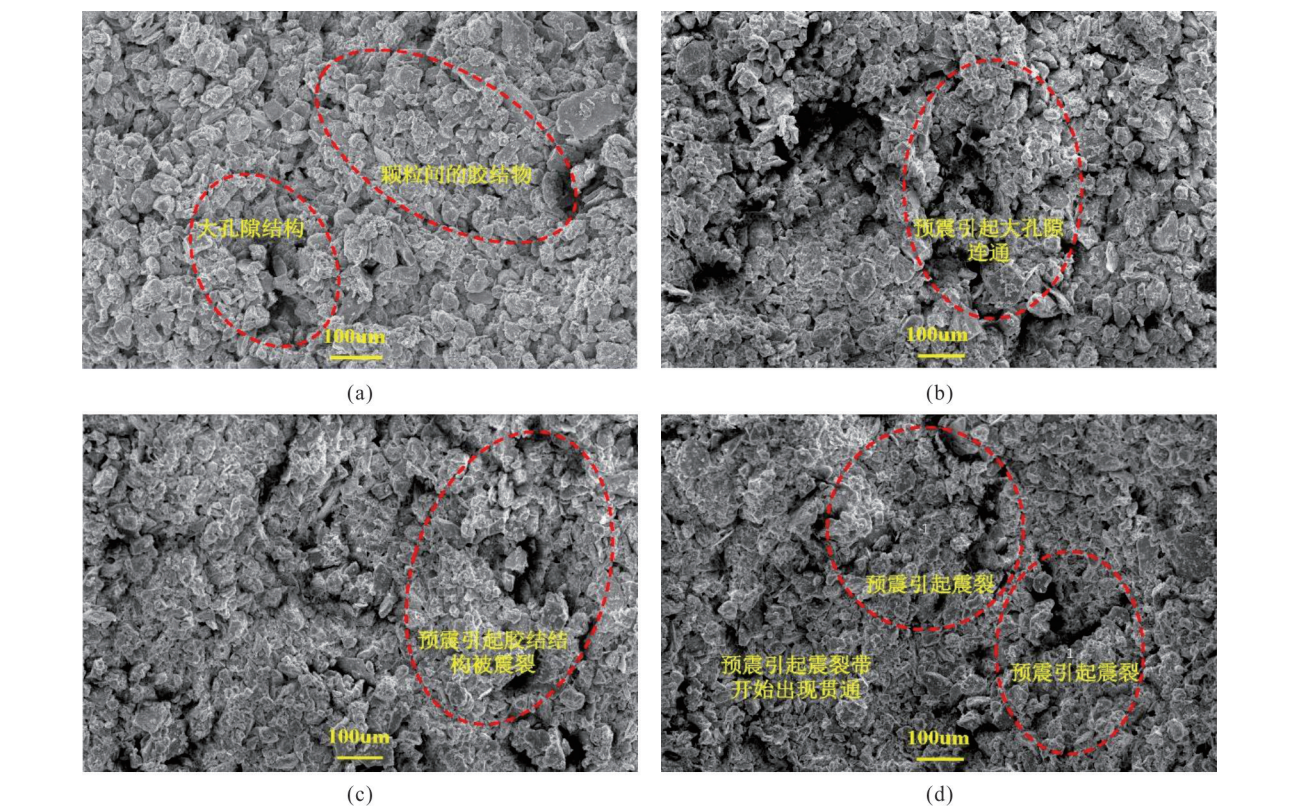


图 10 含水量为 2% 黄土试样预震后微结构图
Fig.10 Schematic diagrams of microstructure of loess sample with water content of 2% after pre-dynamic treatment
a.PGA=0.00 g, W=2%; b.PGA=0.15 g, W=2%; c.PGA=0.30 g, W=2%; d.PGA=0.40, W=2%

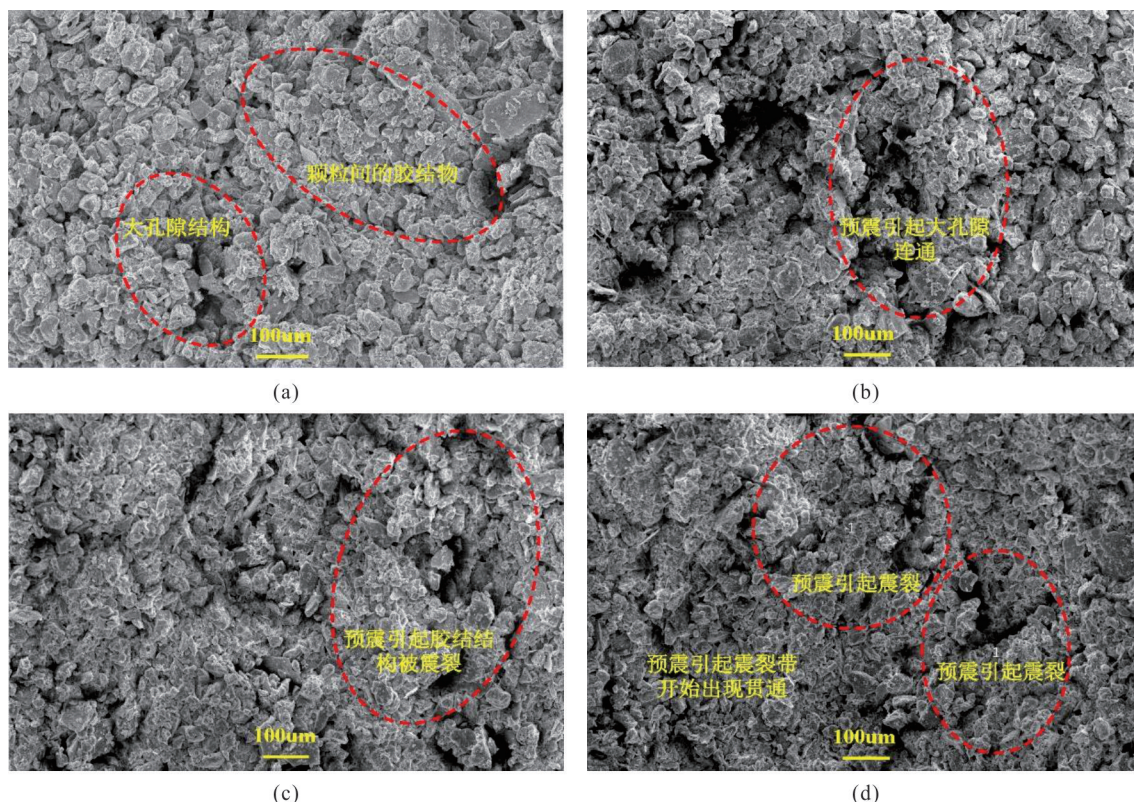


图 11 含水量为 12% 黄土试样预震后微结构图

Fig.11 Schematic diagrams of microstructure of loess sample with water content of 12% after pre-dynamic treatment

a. PGA=0.00 g, W=12%; b. PGA=0.15 g, W=12%; c. PGA=0.30 g, W=12%; d. PGA=0.40 g, W=12%

由图 11 可知,黄土试样的初始含水量增加至 12% 时,未经先期地震扰动的黄土试样中,大孔隙仍占主导地位,预震处理后,高含水量黄土颗粒之间的胶结由刚性转变为塑性,预震处理引起孔隙的孔径逐渐减小,宏观上表现为大孔隙数量减少和中小孔隙增加,但由于大孔隙孔径是中孔隙孔径的数倍甚至数十倍,故其体积含量仍占主导地位。

当 PGA 为 0.30 g 时,部分区域出现了孔隙闭合现象,且大孔隙的形状由不规则状开始向椭圆形转变;当 PGA 为 0.40 g 时,震动荷载进一步增强,颗粒之间相互挤压、推移出现定向排列现象,同时颗粒之间的接触方式由点一面接触、点一点接触向面一面接触转变,颗粒间的间隙经挤压后消失.大颗粒经震动后出现了一定的定向性,孔隙的形状以圆形为主.初始含水量不同时,动荷载作用下黄土的内部结构演化规律截然不同,宏观上表现出降低强度和增加强度两方面,这也是黄土水敏性的宏观表现之一.同时也是原状黄土试样经历先期地震扰动后出现差异性的重要内在机制。

结合微结构中的孔隙分布和不同地震加速度

下的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 拟合出影响土体抗剪强度的结构影响因子 F . 当含水量较低时(2% 初始含水量),结构影响因子为 0.85,随地震加速度的增大,抗剪强度逐渐劣化;当含水量较高时(12% 初始含水量),结构影响因子为 1.13,随着地震加速度的增大,抗剪强度逐渐增强.结构影响因子为黄土经历地震后的结构敏感系数,其数值能够反映黄土在先期地震中受到的扰动程度,是黄土遭受先期地震影响的定量化表征.结构影响因子公式如下:

$$F=0.85, 2\% \text{ 初始含水量,} \\ F=1.13, 12\% \text{ 初始含水量.} \quad (1)$$

综上所述,强震区黄土的力学响应机制受先期地震、初始含水量和应力状态等条件的影响,强震区黄土边坡和路基等工程中,需要充分考虑黄土早期的应力历史,尤其是在挡土结构及黄土基坑工程等设计中需要充分考虑先期地震引起的强度劣化效应,当初始含水量较低时需要在工程设计中预留更多的安全储备,对于初始含水量较高的黄土则可适当降低安全储备。

4 结论

通过对强震区黄土在先期地震影响后的力学特征进行系统分析研究,发现强震区黄土在先期地震影响下其强度出现增加和降低两种截然不同的现象,这种现象与经历先期地震时黄土初始含水量密切相关,利用扫描电镜试验结果对后期力学性质出现差异性的内在机制进行了解释,厘清了强震区黄土微结构演化与力学响应规律的内在关联性,得到结论如下。

(1)含水量为 2% 的黄土试样预震后,其力学强度显著降低,出现了典型的强度劣化现象,其峰值偏应力降幅达 22.52%。含水量为 12% 的黄土试样预震后,其峰值偏应力增幅达 16.31%。含水量为 2% 的黄土试样预震后,抗剪强度显著降低,其内摩擦角降幅达 33.91%,黏聚力降幅达 42.21%;而 12% 的黄土试样预震后,内摩擦角和黏聚力增幅达 21.80% 和 18.96%。

(2)原状黄土在低含水量状态经历地震扰动后出现震损带,即震裂区,致使黄土的孔隙连通性增强,结构强度逐步丧失;而含水量增加至 12% 时,先期地震作用引起黄土内部颗粒接触方式和孔隙形态均发生变化,孔径减小,面一面接触增多,致密的结构引起黄土强度增大。

(3)强震区黄土工程中,需要充分考虑先期地震及初始含水量对黄土结构的影响。2% 含水量附近的低含水量状态,黄土受先期地震影响发生强度劣化,此类工程中需要对已有的设计支护结构进行加强处理;当黄土中含水量达到 12% 附近的相对较高含水量时,地震引起黄土强度增强,可维持原有支护结构或对支护结构进行优化。根据黄土初始含水量和先期地震幅值,科学合理地选择设计方案,可使黄土工程建设更加经济、合理。

References

- An, L., Deng, J., Guo, P., et al., 2019. Correlation between Microscopic Parameters and Dynamic Elastic Modulus of Loess. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 41 (Suppl.2): 105—108 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. B., Chen, X. W., Jing, X. J., et al., 2021. Ergodicity of Turbulence Measurements upon Complex Terrain in Loess Plateau. *Scientia Sinica (Terrae)*, 51(2): 299—313 (in Chinese).
- Chen, W. W., Liu, W., Wang, J., et al., 2019. Relationship between Saturation Degree and B Value for Loess. *Rock and Soil Mechanics*, 40(3): 834—842 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, G. Y., 2003. Study on the Correlation between Saturated Sand Shear Wave Velocity and Liquefaction Resistance (Dissertation). Tianjin University, Tianjin (in Chinese with English abstract).
- Cui, S. H., Pei, X. J., Huang, R. Q., et al., 2020. Excess Interstitial Water Pressure within Sliding Zone Induced by Strong Seismic Shaking: An Initiation Model of the Daguangbao Landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(3): 522—539 (in Chinese with English abstract).
- Gao, G. R., 1981. Classification of Microstructures of Loess in China and Their Collapsibility. *Science in China (Ser. A)*, 24(7): 962—974.
- Gao, G. R., 1996. The Distribution and Geotechnical Properties of Loess Soils, Lateritic Soils and Clayey Soils in China. *Engineering Geology*, 42(1): 95—104. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00056-9)
- Jiang, M. J., Zhang, F. G., Hu, H. J., et al., 2014. Structural Characterization of Natural Loess and Remolded Loess under Triaxial Tests. *Engineering Geology*, 181: 249—260. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.021>
- Liu, W., Chen, W. W., Wang, Q., et al., 2020a. Effect of Pre-Dynamic Loading on Static Liquefaction of Undisturbed Loess. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 130: 105915. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105915>
- Liu, W., Chen, W. W., Yang, F., 2021. Influence of Long-Term Seismic Effect on Mechanical Properties of Loess. *China Earthquake Engineering Journal*, 43(4): 965—976 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Wang, Q., Lin, G. C., et al., 2020b. Effect of Pre-Dynamic Loading on Dynamic Liquefaction of Undisturbed Loess. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18 (13): 5779—5806. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00917-w>
- Ma, L. N., Qi, S. W., Guo, S. F., et al., 2022a. Investigation on the Deformation and Failure Patterns of Loess Cut Slope Based on the Unsaturated Triaxial Test in Yan'an, China. *Journal of Earth Science* (in press). <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1554-4>
- Ma, P. H., Peng, J. B., Zhuang, J. Q., et al., 2022b. Initiation Mechanism of Loess Mudflows by Flume Experiments. *Journal of Earth Science* (in press). <https://doi.org/>

- 10.1007/s12583-022-1660-y
- Mao, Y. D., Wang, Z. X., Pang, Z. B., 2021. Two Significant Stages in the Aridification of the Eastern Chinese Loess Plateau since 1.2 Ma. *Earth Science*, 46(1): 272–280(in Chinese with English abstract).
- Min, L. R., Fan, H., 1988. The Formation of the Loess Plateau in China and the Discussion on the Causes of Loess. *Chinese Science Bulletin*, 33(9): 690–692(in Chinese).
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, 2016. Code for Seismic Design of Buildings GB 50011–2010. China Construction Industry Press, Beijing(in Chinese).
- Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2011. Code for Geological Investigation of Highway Engineering JTGC20–2011. People's Communications Press, Beijing(in Chinese).
- Pei, X. J., Zhang, X. C., Guo, B., et al., 2017. Experimental Case Study of Seismically Induced Loess Liquefaction and Landslide. *Engineering Geology*, 223: 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.016>
- Sun, J. Z., 2005. Loess Science (Part 1). Hong Kong Archaeological Society, Hong Kong(in Chinese).
- Sun, P., Li, R. J., Jiang, H., et al., 2017. Earthquake-Triggered Landslides by the 1718 Tongwei Earthquake in Gansu Province, Northwest China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(4): 1281–1295. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0949-4>
- Toyota, H., Takada S., 2017. Variation of Liquefaction Strength Induced by Monotonic and Cyclic Loading Histories. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(4): 04016120. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001634](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001634)
- Wang, J. D., Xu, Y. J., Zhang, D. F., et al. 2021. Study on the Effect of Loess Vibration on Permeability. *Scientia Sinica (Terrae)*, 51(5): 763–782(in Chinese).
- Wang, Q., Wang, P., Wang, J., et al., 2015. Effect of Microstructure Properties on of Dynamic Residual Deformation Behavior of Saturated Loess. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 37(Suppl.2): 143–147(in Chinese with English abstract).
- Wang, S. Y., Luna, R., Onyejekwe, S., 2016. Effect of Initial Consolidation Condition on Postcyclic Undrained Monotonic Shear Behavior of Mississippi River Valley Silt. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2): 04015075. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001401](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001401)
- Wang, S. Y., Luna, R., Onyejekwe, S., 2015a. Postliquefaction Behavior of Low-Plasticity Silt at Various Degrees of Reconsolidation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 75: 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.04.014>
- Wang, S. Y., Luna, R., Zhao, H. H., 2015b. Cyclic and Post-Cyclic Shear Behavior of Low-Plasticity Silt with Varying Clay Content. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 75: 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.03.015>
- Wang, S. Y., Luna, R., Yang, J. S., 2013. Postcyclic Behavior of Low-Plasticity Silt with Limited Excess Pore Pressures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 54: 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.07.016>
- Wu, Z. J., Zhang, D., Wang, S. N., et al., 2020. Dynamic-Response Characteristics and Deformation Evolution of Loess Slopes under Seismic Loads. *Engineering Geology*, 267: 105507. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105507>
- Xie, D. Y., Qi, J. L., Zhu, Y. L., 1999. Soil Structure Parameter and Its Relations to Deformation and Strength. *Journal of Hydraulic Engineering*, 30(10): 1–6(in Chinese with English abstract).
- Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K., et al., 2012. Characteristics of Liquefaction in Tokyo Bay Area by the 2011 Great East Japan Earthquake. *Soils and Foundations*, 52(5): 793–810. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.004>
- Yasuda, S., Tohno, I., 1988. Sites of Reliquefaction Caused by the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake. *Soils and Foundations*, 28(2): 61–72. https://doi.org/10.3208/sandf1972.28.2_61
- Zhang, Y., 2019. Study on the Evolution of Loess Structure and Its Constitutive Model in Acidic Environment (Dissertation). Xi'an University of Technology, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. Y., 1992. Neotectonics and Neotectonic Movement of the Loess Plateau and Its Adjacent Regions. *Quaternary Sciences*, 12(3): 252–264(in Chinese with English abstract).
- Zhuang, J. Q., Peng, J. B., Xu, C., et al., 2018. Distribution and Characteristics of Loess Landslides Triggered by the 1920 Haiyuan Earthquake, Northwest of China. *Geomorphology*, 314: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geomorphology.2018.03.012>

morph.2018.04.012

Zhuang, Y., Xing, A.G., Cheng, Q.G., et al., 2020. Characteristics and Numerical Modeling of a Catastrophic Loess Flow Slide Triggered by the 2013 Minxian-Zhangxian Earthquake in Yongguang Village, Minxian, Gansu, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(1): 439—449. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01542-x>

附中文参考文献

安亮, 邓津, 郭鹏, 等, 2019. 黄土微观参数指标与动弹性模量关联度研究. *岩土工程学报*, 41(增刊 2): 105—108.

陈晋北, 陈霄文, 荆肖军, 等, 2021. 黄土高原复杂地形条件下湍流观测的各态历经性检验. *中国科学: 地球科学*, 51(2): 299—313.

谌文武, 刘伟, 王娟, 等, 2019. 黄土饱和度与 B 值关系试验研究. *岩土力学*, 40(3): 834—842.

程国勇, 2003. 饱和砂土剪切波速与抗液化强度相关性的研究(博士学位论文). 天津: 天津大学.

崔圣华, 裴向军, 黄润秋, 等, 2020. 强震过程滑带超间隙水压力效应研究: 大光包滑坡启动机制. *岩石力学与工程学报*, 39(3): 522—539.

刘伟, 谌文武, 杨芳, 2021. 地震长期效应对黄土力学性质的影响. *地震工程学报*, 43(4): 965—976.

毛永栋, 王治祥, 庞志斌, 2021. 黄土高原东部(山西阳曲) 1.2 Ma 以来黄土记录的两次显著干旱化事件. *地球科学*, 46(1): 272—280.

闵隆瑞, 范蕙, 1988. 中国黄土高原的形成及其黄土成因的探讨. *科学通报*, 33(9): 690—692.

孙建中, 2005. 黄土学(上篇). 香港: 香港考古学会.

王家鼎, 许元珺, 张登飞, 等, 2021. 黄土振动促渗效应研究. *中国科学: 地球科学*, 51(5): 763—782.

王谦, 王平, 王峻, 等, 2015. 微结构特性对饱和黄土动残余变形的影响研究. *岩土工程学报*, 37(增刊 2): 143—147.

谢定义, 齐吉琳, 朱元林, 1999. 土的结构性参数及其与变形强度的关系. *水利学报*, 30(10): 1—6.

张耀, 2019. 酸性环境下黄土结构的演变及其本构模型研究(博士学位论文). 西安: 西安理工大学.

中华人民共和国住房和城乡建设部, 2016. 《建筑抗震设计规范》, GB 50011—2010. 北京: 中国建筑工业出版社.

中华人民共和国交通运输部, 2011. 《公路工程地质勘察规范》, JTGC20—2011. 北京: 人民交通出版社.

朱照宇, 1992. 黄土高原及邻区新构造与新构造运动. 第四纪研究, 12(3): 252—264.