

饱和黄土液化后强度与变形特性的试验研究^①

师伟雄¹, 张子东², 高和新², 涂国祥³, 张晓超³

(1. 中铁二院西北勘察设计有限责任公司, 甘肃 兰州 730000;

2. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059;

3. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:采用 MTS810 动三轴试验仪, 用二氧化碳+脱气水循环渗流法对重塑黄土进行饱和, 进行了一系列对石碑塬滑坡区饱和黄土液化后变形特性试验。考虑干密度和初始有效围压对黄土液化后变形特性的影响, 将液化与未液化黄土在单调静荷载作用下的应力-应变曲线进行对比。实验结果表明: 利用二氧化碳+脱气水循环渗流法可以使重塑黄土饱和取得较好的效果; 饱和石碑塬黄土具有明显的液化特征, 在强震作用下发生液化, 液化后强度大大衰减, 应力-应变曲线呈弱硬化型, 分为两个阶段; 干密度和初始有效围压对液化后黄土的强度有一定影响, 初始有效围压与不排水强度呈拟合度较高的线性关系, 初始有效围压越高, 液化后不排水强度越大。

关键词:石碑塬黄土; 饱和方法; 室内试验; 液化后变形; 液化后强度

中图分类号: TU435; TU41

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)06-0922-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.06.0922

Experimental Study on the Post-liquefaction Strength and Deformation Behavior of Saturated Loess

SHI Wei-xiong¹, ZHANG Zi-dong², GAO He-xin², TU Guo-xiang³, ZHANG Xiao-chao³

(1. CREEC (Northwest) Survey and Design Co. LTD, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. College of Environmental and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: A series of tests are performed to explore the post-liquefaction deformation characteristics of saturated loess in the Shibei yuan tableland area. In addition, we compare the stress-strain curves of liquefied loess with those of non-liquefied ones under monotonic static load using the MTS810 dynamic triaxial testing apparatus. We also discuss the influence of drying density and initial effective confining pressure on the post-liquefaction deformation characteristics of loess. The experimental results show that the ventilation period and water period greatly influence the pore pressure coefficient (B value). The saturated loess in the Shibei yuan tableland has obvious liquefaction characteristics; it is easily liquefied under strong earthquakes, and its strength is greatly decreased after liquefaction. The stress-strain curve of saturated loess after liquefaction under monotonic static loads changes into the weak hardening type in two stages: strength recovery and stable strength. The drying density and initial effective confining pressure have a certain effect on the strength of liquefied loess. There is a linear positive relationship with good fitting between the initial effective confining pressure and undrained strength after liquefaction.

① 收稿日期: 2015-08-30

基金项目: 中国地调局项目(1212011140005); 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB744703)

作者简介: 师伟雄(1994—), 男, 甘肃会宁人, 本科生, 研究方向: 地质工程。E-mail: 1248871740@qq.com。

Key words: loess in Shibeiyuan tableland; saturation method; indoor test; post-liquefaction deformation; post-liquefaction strength

0 引言

黄土广泛分布于中国西北地区,由于该地区的地下水位相对较深,长期以来黄土的液化特性并未被人们所认识。直到 1982 年 S.Prakash 等^[1]首次提出黄土液化问题以后,黄土发生液化破坏才得到广泛的认可。之后王兰民等^[2]对黄土液化进行一系列的研究后提出了判定黄土液化的标准。

我国黄土地区大多都处于高烈度地震区。由统计数据可知,太原、西安、兰州等黄土地区近年来的城市地下水位普遍有所上升,随着农业灌溉条件的逐渐好转和城市扩张,这些地区的饱和黄土和高含水量黄土的分布范围逐渐增加。若发生一定震级的地震,黄土产生液化的可能性较大^[3],而以粉粒为主的颗粒组成使得其性质具有“类砂”和“类黏土”的特点,所谓“类砂”就是黄土能够发生液化^[4]。

国内外学者从液化方法、影响因素、判别标准及液化机制等不同角度研究了黄土液化现象^[5-7],取得了有益的研究成果。然而,几乎所有的研究仅在黄土液化方面,对黄土液化后强度与变形特性的研究

相对甚少。对比砂土、粉土液化以后发生的变形研究发现:地震作用使得部分土体发生液化,再在静剪应力的作用下发生大的变形,进而发生较大位移的变形甚至滑坡,引发更大的自然灾害^[8]。对 1920 年海原大地震黄土滑坡的调查和研究表明,饱和黄土或高含水率黄土在地震作用下会发生液化,其中石碑塬滑坡(移)是地震诱发黄土液化的典型代表^[9]。因此有必要通过室内试验揭示饱和黄土液化后的强度与变形规律。

石碑塬滑坡位于宁夏固原境内的清水河四级阶地上,由 1920 年海原 8.5 级大地震诱发,该地震震中烈度为Ⅷ度。石碑塬距震中 70~90 km,烈度为Ⅹ度。滑移区总体走向为 N20° W,沿走向长为 6 km,宽为 1.2~1.8 km,面积约为 9 km²。本区的地层情况自上而下依次为:晚更新世马兰黄土 Q₃(0~25 m),中更新世离石黄土 Q₂。马兰黄土具有较高的液化势和流态破坏势,在强震作用下孔隙水压力的累积增长导致饱和黄土发生液化流滑^[9]。取样点位置及石碑塬滑坡全貌如图 1 所示。

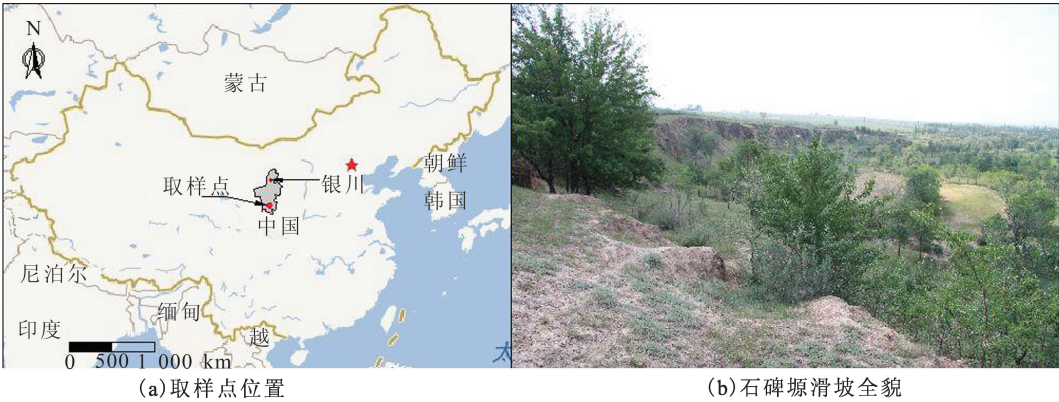


图 1 取样点位置和石碑塬滑坡全貌^[10]

Fig.1 Location of sampling points and an overall view of the Shibeiyuan landslide

1 试验的材料与方法

1.1 试样制备

试样采用石碑塬滑坡滑移区重塑黄土样,其基本性质如表 1。制备过程按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)进行,样品规格为直径 50 mm、高度 100 mm。采用击实成型法,在制样模具中分 4 次击实,根据干密度和含水率的大小确定每层重量,由重量确定每层击数,击数范围为 3~5 击。

为保证上下接触良好,需对接触面充分刮毛,试验之前测其实际高度与直径。

表 1 试验黄土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical parameters of experimental loess					
黏粒含 量/%	粉粒含 量/%	砂砾含 量/%	干密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	液限 /%
8.36	80.4	11.24	1.3~1.5	9	29

1.2 试验方法

试验设备主要采用美国 MTS 公司生产的

MTS 810 程控伺服土动三轴试验机。液化之前先对试样进行饱和与固结。对于黄土的饱和方法,前人通常采用脱气水位循环差法,可在 1 h 左右使原状黄土的饱和度达到规范要求的 80% 以上^[11];孙海妹等^[12]认为对初始饱和度较低的原状黄土可以采用反压饱和法或抽气饱和法使孔压系数 B 值达到 0.95 以上。由于黄土结构的特殊性及其敏感的水理特性,通常是大中孔隙被水充填,微小孔隙水很难进入,导致黄土饱和过程较砂土、粉土困难。现行的饱和方法主要矛盾是饱和度与饱和时间,在较短时间内很难达到理想的饱和度,且不损伤试样结构。本次试验采用二氧化碳+脱气水循环渗流法,利用二氧化碳密度较空气大和易溶于水的性质,就通气时长、通水时长等对黄土孔压系数 B 值的影响规律进行探讨。首先对试样施加 20 kPa 围压,让二氧化碳从试样下部向上部流动,通过观察气泡数目确定通气速率,持续一定时间后从下至上通入脱气水不断循环。试验结果如图 2 所示。

图 2(a)为通水时长为 4 h 时通气时长与 B 值的关系曲线图。由图可知,通气时间对 B 值影响较大;当通气时长小于 3 h 时, B 值随通气时长的增加近似呈线性提高,是微小孔隙中空气被置换排除试样外的过程;当超过 3 h 后, B 值随通气时长上下波动,大部分孔隙被二氧化碳置换,只有极少部分微小孔隙未置换,且随着二氧化碳不断的通入,试样颗粒骨架受损,部分孔隙连为一体,降低了气体置换率, B 值出现上下波动现象;3.5 h 之后, B 值大部分落在红线($B \geq 0.95$ 线)及其之上,此时通气时长不再是主要影响因素。因此其最佳值为 3.5 h。

图 2(b)是通气时长为 4 h 时通水时长与 B 值关系曲线图。发现通水时长- B 值关系曲线和通气时长- B 值关系曲线形态相似。通水时长小于 4 h 时, B 值随通水时长的增加不断提高;4 h 之后通水时长对 B 值影响不大, B 值都落在红线及其之上,主要是由于此时试样孔隙中的二氧化碳几乎全部溶解,导致通水时间不再是主要因素。若继续通水会使得可溶盐不断溶解,试样溃散而产生较大变形,因此通水时长最佳值为 4 h。

利用二氧化碳+脱气水循环渗流法对 15 个黄

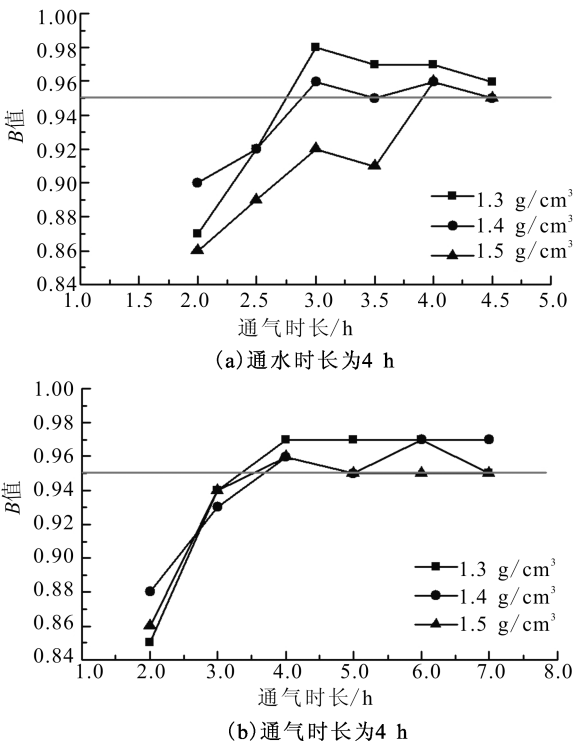


图 2 通气时长、通水时长与 B 值关系曲线
Fig.2 Relationship between ventilation period, water period and B value

土试样进行饱和,其中通气时长分别为 3.5 和 4 h,通水时长分别为 4 和 4.5 h。表 2 是不同通水、通气时长- B 值的统计表。可以看出:有 3 组试样的 B 值没有达到 0.95,这可能是试验时通气速率的变化所致;试验合格率为 80%,成功率相对较高。认为通气时长最佳为 3.5~4 h,通水时长最佳为 4~4.5 h。

试样在等压固结条件下(固结比为 1)固结完成后,在不排水条件下施加振动频率为 1 Hz、动应力为 60 kPa 的正弦波。根据王兰民提出的等压固结黄土液化判别标准:一是孔压比 ≥ 0.7 ;二是累积应变 $\geq 3\%$,且孔压比 ≥ 0.2 ,这两个标准哪一个先达到就采用哪一个^[13]。本次试验认为当累积应变 = 3% 时发生液化,此时孔压比都 ≥ 0.7 。试样充分液化,在不排水条件下以 0.34 mm/min 的应变速率控制试样的变形直至其完全破坏,试验数据由计算机自动采集并生成相应的数据文件。整个加载过程如图 3 所示。

表 2 不同通水、通气时长- B 值统计表
Table 2 Statistics of different water and ventilation period- B value

通气时长/h	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4	4	4	4	4	4	4
通水时长/h	4	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4	4	4	4	4	4.5	4.5
B 值	0.97	0.95	0.91	0.92	0.96	0.97	0.96	0.94	0.97	0.96	0.96	0.97	0.96	0.96	0.95

对试验结果进行整理,将液化和未液化黄土在单调加载条件下的应力-应变曲线进行对比,分析二者力学特性的变化规律;然后讨论干密度($\rho_d=1.3$ 、 1.4 、 1.5 g/cm^3)和初始有效围压($\sigma'_0=100$ 、 200 、 300 kPa)对黄土液化后强度的影响规律。

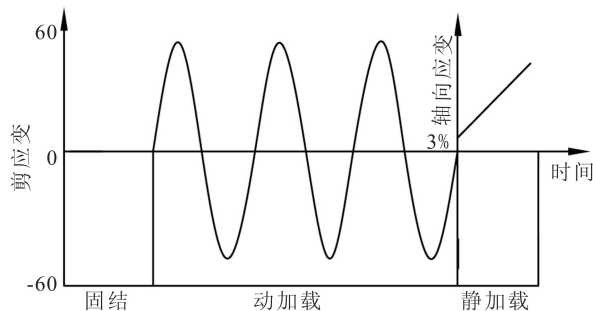


图 3 动加载及静加载过程

Fig.3 Process of dynamic loading and static loading

2 试验结果及分析

图 4 是不同 ρ_d 、 σ'_0 下液化及未液化黄土的应力-应变曲线。由图 4(a)、(b)、(c)可见,在一定初始条件下,与未液化黄土相比,液化后黄土剪切强度明显降低。液化饱和黄土在单调静荷载作用下应力-应变曲线呈弱硬化型,主要分为 2 个阶段:强度恢复段和强度稳定段。动荷载下饱和黄土发生液化,其结构遭到破坏,部分可溶盐溶解,颗粒间连接强度降低,但仍具有一定的抗剪强度和相当的剪切模量^[4]。故在静荷载加载初期应力随应变增大,当轴向应变发展到一定程度,强度不再增加、趋于稳定,颗粒间处于另一种较为稳定的平衡状态,对应的强度定义为液化后不排水强度 S_u , S_u 是液化后强度恢复能力的指标。

非液化饱和黄土在单调静荷载作用下应力-应变曲线呈强软化型,可分为 3 个阶段:应力随应变增大段、应力随应变减小段和应力随应变增加基本不变段。破坏前应力-应变曲线为直线,应变小,土体内部结构发挥作用,抵抗外部荷载;达到峰值强度时,原始结构破坏,颗粒骨架承受外荷载能力减弱;峰值后强度出现软化,颗粒间重组开始,向稳定状态过渡,处于较为稳定的平衡状态时强度保持不变即为残余强度。不排水强度 S_u 与残余强度接近,虽然应力路径不同,但最终的平衡状态对应的强度几乎相等[图 4(d)]。由于实验仪器及操作方法等原因,不排水强度 S_u 与残余强度之间仍存在一定的差值。

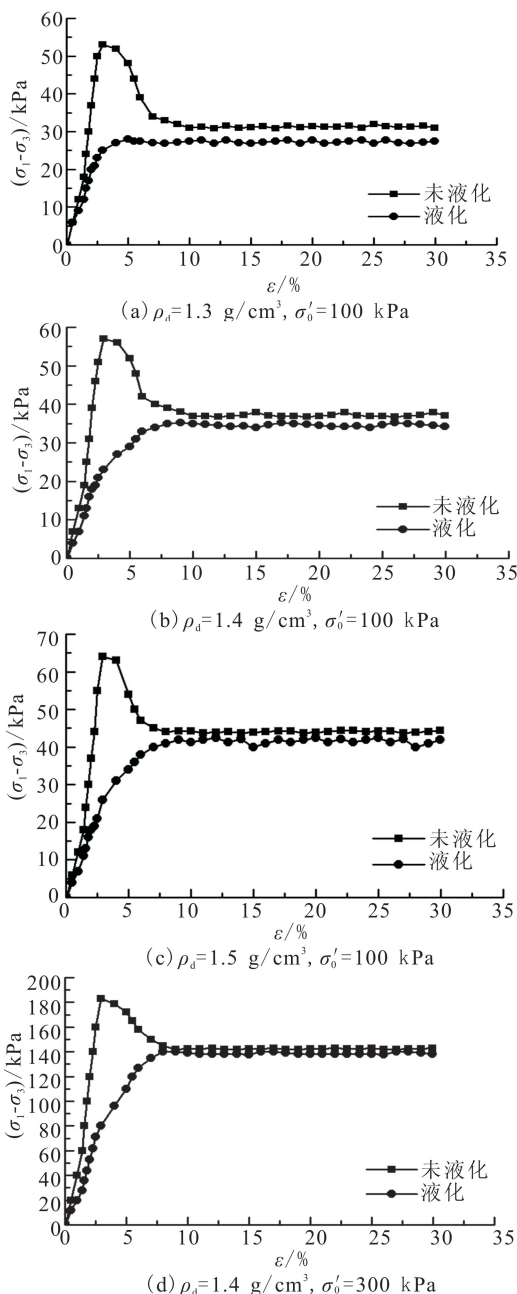


图 4 饱和黄土液化、未液化的应力-应变曲线

Fig.4 Post-liquefaction and non-liquefaction strain-stress curves of saturated loess

2.1 不同干密度的影响

由图 5 可知干密度对液化后不排水强度 S_u 有一定影响,但曲线的变化阶段及趋势不会随着干密度的变化而改变,其仍有两个阶段,对每一阶段的划分区间及所对应的应变值几乎没有发生变化。随着干密度增大,不排水强度 S_u 也增加,因为随着干密度的增大,土体发生液化后土颗粒之间的联结点数目相对较多,剩余的抗剪强度相对较大,土颗粒骨架较为密实,整体性较强,土体恢复强度的能力越大,

从而使试样整体联结力增强,所以液化后土体的不排水强度增大;对第一阶段的切线模量影响较小,变化不大。由图 6 可发现其具有较好的线性关系,拟合曲线表现的线性关系如式(1)。干密度对液化后饱和黄土的应力-应变曲线有一定的影响,对液化后不排水强度 S_u 有较大影响,其值随干密度增加而变大;相对不同固结围压条件下,干密度对强度影响较固结围压的影响小,变化幅度小。

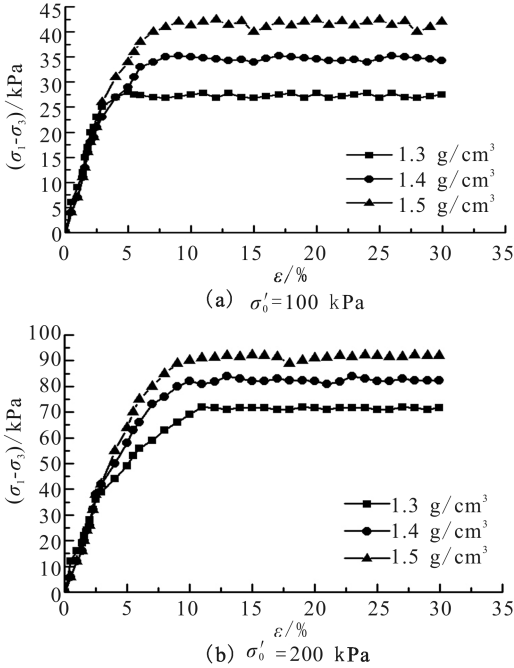


图 5 $\sigma'_0 = 100, 200 \text{ kPa}$ 时液化后应力-应变关系曲线
Fig.5 Post-liquefaction stress-strain curves when $\sigma'_0 = 100, 200 \text{ kPa}$

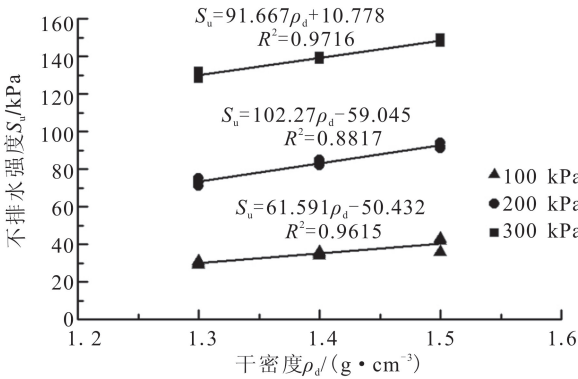


图 6 液化后不排水强度与干密度关系曲线
Fig.6 Relationship between undrained strength and drying density after liquefaction

2.2 初始有效围压 σ'_0 的影响

图 7 是不同初始有效围压 σ'_0 条件下不排水剪

切试验应力-应变关系曲线。由图可知:初始有效围压对液化后饱和黄土不排水强度 S_u 有较大影响,随着初始有效围压的增大,不排水强度也随之增加,应力-应变曲线的两个阶段及变化趋势没有较大影响;第一阶段曲线变陡,切线模量增大,主要因为初始有效围压大,试样固结过程中排水量较多,试样颗粒间的连接强度相对大,试样整体结构性较好,土体的次生结构得到了增强;当初始有效围压比较大时,液化之前颗粒间的连接强度大,在同一动应力作用下发生液化,颗粒间具有的连接强度较低,初始有效围压大,相应的剩余抗剪强度大,在静荷载作用下,颗粒重新组合的能力越强,有较强的恢复能力。

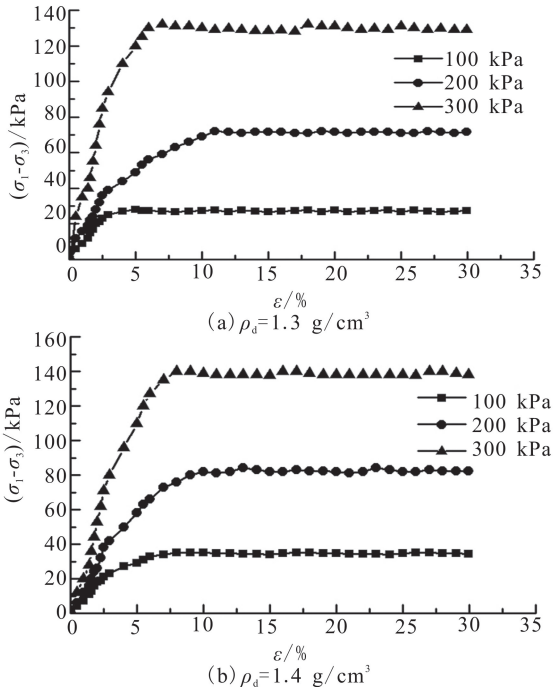


图 7 $\rho_d = 1.3, 1.4 \text{ g/cm}^3$ 时液化后应力-应变关系曲线
Fig.7 Post-liquefaction stress-strain curves when $\rho_d = 1.3 \text{ g/cm}^3$ and $\rho_d = 1.4 \text{ g/cm}^3$

图 8 是不排水强度 S_u 与固结围压 σ'_0 关系曲线。对其进行拟合可以看出:不排水强度 S_u 与 σ'_0 之间具有较高的相关性,拟合直线的斜率随固结围压变化并不大。为了能够提出一个 S_u 与 σ'_0, ρ_d 之间的关系式,现将拟合直线的斜率以平均值做处理,其与土样的基本结构有关,可调节 σ'_0 的单位,提出统一的公式,即

$$S_u = 0.5\sigma'_0 - C \quad (1)$$

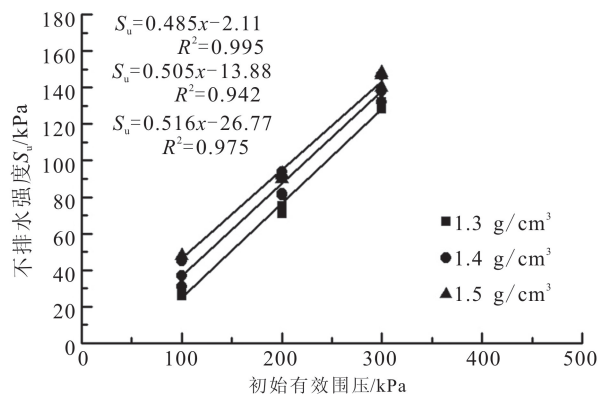


图8 液化后不排水强度与围压关系曲线

Fig.8 Relationship between undrained strength and confining pressure after liquefaction

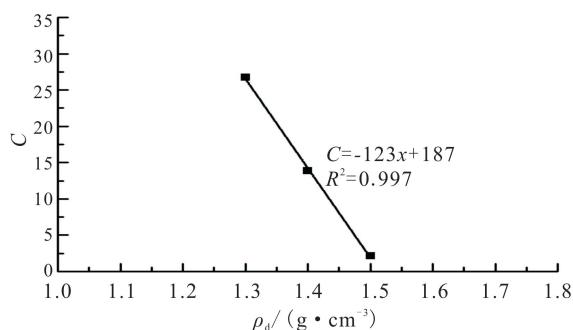


图9 C值与干密度关系曲线

Fig.9 Relationship between C value and drying density

式中: C值用干密度来表征。

图9是C值与干密度 ρ_d 之间的关系曲线。也对其进行拟合,可以看出C与干密度之间也有较好的相关性,相关性系数为0.997,C可以表示为:

$$C = A\rho_d + B \quad (2)$$

式中:A、B与土样的基本性质有关,A可以调节 ρ_d 的单位。其中A为-123,B为187,由式(1)与式(2)可以得出 S_u 与 σ'_0 、 ρ_d 之间的关系式,即

$$S_u = 0.5\sigma'_0 + 123\rho_d - 187 \quad (3)$$

式中:0.5、123与土体性质有关,可调节 σ'_0 、 ρ_d 单位。可以用上述公式来计算已知干密度及固结围压条件下的饱和重塑黄土液化后不排水强度的大小。

为了验证本文公式的适用性,对于干密度分别为 $\rho_d = 1.35 \text{ g/cm}^3$ 、 1.45 g/cm^3 ,初始有效围压 $\sigma'_0 = 150 \text{ kPa}$ 、 250 kPa 的试样进行验证。采用公式所得的计算值分别为54.05 kPa、116.35 kPa,试验值分别为57 kPa、110 kPa,计算值与试验值较为吻合。然而,由于目前关于黄土液化后前相特性研究成果较少,该公式还有待更广泛地验证和进一步的修正。

3 结论

通过对石碑塬滑坡区饱和重塑黄土液化后的静力加载试验研究,得到如下结论:

(1) 对于重塑黄土,可以采用二氧化碳+脱气水循环渗流法使孔压系数B值达到0.95以上,通气时长与通水时长对B值有一定的影响,最佳通气时段为3.5~4 h,最佳通水时段为4~4.5 h。

(2) 饱和石碑塬黄土具有明显的液化特征,在强震作用下发生液化后其强度大大衰减,应力-应变曲线呈弱硬化型,分为两个阶段:强度恢复段和强度稳定段。未液化饱黄土应力-应变曲线呈强软化型,土体最终处于一种较为稳定的平衡状态。

(3) 在同一初始有效围压下,液化后不排水强度 S_u 随干密度 ρ_d 增大而增加,相同的干密度 ρ_d 之下,初始有效围压越大,液化后颗粒重新组合的能力越强,强度恢复能力越强, S_u 与初始有效围压间有较高的相关性,并提出了不排水强度与干密度、初始有效围压之间的关系式。

目前对黄土液化后强度与变形特性的研究资料较少,通过室内试验所取得的研究成果还需进一步的验证与深入研究。

参考文献(References)

- [1] Prakash S, Puri V K. Liquefaction of Loessial Soils[C]//Proceedings of 3rd International Conference on Seismic Microzonation, Seattle, Wash (Vol. II). 1982:1101-1107.
- [2] 袁中夏,王兰民, Susumu Yasuda,等.黄土液化机理和判别标准的再研究[J].地震工程与工程振动,2004,24(4):164-169.
YUAN Zhong-xia, WANG Lan-min, YASUDA S et al. Further Study on Mechanism and Discrimination Criterion of Loess Liquefaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(4): 164-169. (in Chinese)
- [3] 孙海妹,王兰民,王平,等.振动荷载作用下黄土应变增长特征试验研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(6):61-65.
SUN Hai-mei, WANG Lan-min, WANG Ping, et al. Experimental Study on the Deformation Characteristics of Loess under Cyclic Load[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 61-65. (in Chinese)
- [4] 王兰民,袁中夏,汪国烈,等.饱和黄土场地液化的工程初判和详判指标与方法研究[J].地震工程学报,2013 35(1):1-5.
WANG Lan-min, YUAN Zhong-xia, WANG Guang-lie, et al. Study on Method for Preliminary and Detailed Evaluation on Liquefaction of Loess Sites[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013 35(1): 1-5. (in Chinese)
- [5] 王兰民,刘红玫,李兰,等.饱和黄土液化机制与特性的试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(1):89-94.

- WANG Lan-min, LIU Hong-mei, LI Lan, et al. Laboratory Study on the Mechanism and Behaviors of Saturated Loess Liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 89-94. (in Chinese)
- [6] 刘红玫, 王兰民. 饱和黄土液化的孔隙微结构特征[J]. 西北地震学报, 2002, 24(2): 135-139.
- LIU Hong-mei, WANG Lan-min. Study on the Liquefaction Mechanism and Pore Microstructure of Saturated Loess[J]. Northwestern Seismological Journal, 2002, 24(2): 135-139. (in Chinese)
- [7] 谢睿, 裴向军. 强震作用下饱和黄土液化特性试验研究[J]. 路基工程, 2014(2): 49-52.
- XIE Rui, PEI Xiang-jun. Experimental Study on Characteristics of Saturated Loess Liquefaction under Action of Strong Earthquake[J]. Subgrade Engineering, 2014(2): 49-52. (in Chinese)
- [8] 张建民, 时松孝次, 田屋裕司, 等. 饱和砂土液化后的剪切吸水效应[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 398-400.
- ZHANG Jian-min, Tokimatsu Kohji, Taya Yuhji, et al. Effect of Water Absorption in Shear of Post-liquefaction Sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 398-400. (in Chinese)
- [9] 张晓超, 黄润秋, 许模, 等. 石碑塬滑坡黄土液化特征及其影响因素的研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 801-803.
- ZHANG Xiao-chao, HUANG Run-qiu, XU Mo, et al. Loess Liquefaction Characteristics and Its Influential Factors of Shibei-yuan Land Slide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 801-803. (in Chinese)
- [10] 黄润秋, 裴向军, 张晓超, 等. 黄土动参数与地震诱发黄土滑坡灾害机理专题研究报告[R]. 2014.
- HUANG Run-qiu, Pei Xiang-jun, ZHANG Xiao-chao, et al. Loess Dynamic Parameters and Earthquake Induced Landslide Hazard Mechanism Research Report[R]. 2014. (in Chinese)
- [11] 王兰民, 石玉成, 刘旭. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- WANG Lan-min, SHI Yu-cheng, LIU Xu. Loess Dynamics [M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese)
- [12] 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, 31(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, 31(11): 3463-3468. (in Chinese)
- [13] 袁中夏, 王兰民, 王平. 黄土液化机理和判别标准的再研究[J]. 地震工程和工程振动, 2004, 24(4): 164-168.
- YUAN Zhong-xia, WANG Lan-min, WANG Ping. Further Study on Mechanism and Discrimination Criterion of Loess Liquefaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(4): 164-169. (in Chinese)
- [14] 杨振茂, 赵成刚, 王兰民. 饱和黄土液化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 864-871.
- YANG Zhen-mao, ZHAO Cheng-gang, WANG Lan-min. Testing Study of Saturated Loess Liquefaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 864-871. (in Chinese)