

饱和黄土液化判别方法的两点发现^①

董 林^{1,2}, 王兰民^{1,2}, 夏 坤²

(1.中国地震局工程力学研究所,黑龙江 哈尔滨 150080;
2.中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要:黄土液化实例多与现有可液化土地质年代规定不符。采用动三轴弯曲元试验设备对原状黄土饱和过程进行剪切波速跟踪测试,发现黄土浸水、结构先破坏再固结形成新的稳定结构的特点,证明经历过饱和的黄土已不能再视其为饱和前的地质年代。兰州马兰黄土中的黏粒有些是以黏土团块的形式存在,而黏土团块并不影响其他部分粉质土的液化,因此对于此类土应用黏粒含量进行液化判别时,应考虑将黏土团块不计入黏粒含量。

关键词:黄土;液化;地层年代;剪切波速;黏粒含量

中图分类号:P315.2

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2016)05-0770-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0770

Two Discoveries in the Liquefaction Evaluation Method of Saturated Loess

DONG Lin^{1,2}, WANG Lan-min^{1,2}, XIA Kun²

(1.*Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China;*
2.*Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

Abstract: According to the seismic design code for buildings in China, the soil formed during or before the late Pleistocene will not be liquefied. However, case histories and laboratory test results show that the saturated late Pleistocene loess is potentially vulnerable to liquefaction. Using a cyclic triaxial apparatus with a bender element system, the shear wave velocities of undisturbed loess are tested continuously during sample saturation. The test results indicate that the shear wave velocity of loess in the saturation process is rapidly reduced in the first 10~20 min, and then, it becomes stable. Shear wave velocity is a parameter that accounts for the small strain shear stiffness of soil, which accurately characterizes soil structure. The rapid reduction of shear wave velocity indicates that the microstructure of the loess is destroyed by the sample saturation process. The stable shear wave velocity indicates that the saturated loess has a new stable microstructure. The above analysis proves that the saturated loess is different from the loess before saturation. Indeed, only loess that has been subjected to agricultural irrigation or groundwater rise is liquefied. Because the structure of the saturated loess differs from that of the original loess, different seismic design regulations should be applied as well. Therefore, the seismic design code for buildings in China should be adapted to consider the level of saturation of the loess in addition to its age. Furthermore, the saturated loess is no longer the late Pleistocene loess, and the geological age of liquefied loess may be consistent with seismic design code of buildings in China. We observed that clay particles exist in some loess as clay lumps, and clay lumps do not affect the liquefaction of other silty parts of the soil. However, in the clay content test, if the soil sample con-

① 收稿日期:2015-10-10

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2013IESLZ03);国家科技部地震行业专项(201308015)

作者简介:董 林(1985—),男,安徽人,博士研究生,助理研究员,主要从事岩土地震工程研究。E-mail:donglin408@163.com。

tains clay lumps, the clay content test result will be comparatively high and inconsistent with the static and dynamic mechanical behavior of the soil. Consequently, clay lumps should be removed from the clay content test sample, and then, the remaining clay content should be used to evaluate the soil's liquefaction potential.

Key words: loess; liquefaction; stratigraphic chronology; shear wave velocity; clay particle content

0 引言

黄土液化的判别是工程界长期存疑的问题,《建筑抗震设计规范》GB50011-2010^[1]在饱和砂土、粉土液化判别条款中明确指出不含黄土。其中,关于地质年代初判准则,黄土与砂土、粉土差别最显著。《建筑抗震设计规范》规定砂土、粉土地质年代为第四纪晚更新世(Q₃)及其以前,Ⅶ、Ⅷ度时可判为不液化。而无论震害实例还是室内试验都表明,Q₃黄土也具有很大的液化势和流态破坏势^[2-5]。如 1989 年前苏联塔吉克 5.5 级地震在半干旱的缓斜坡丘陵地形地貌下近乎平坦的风成黄土层中触发了广泛的液化,并形成大规模泥流,向前流滑了 2.0 km,致使 100 多栋房屋埋在 5 m 厚的泥中,200 人丧生或失踪。Ishihara K 等^[6]调查分析后认为,液化的发生是由于农业灌溉水湿化了 7~17 m 范围多孔隙风成黄土层(Q₃)。1920 年中国海原 8.5 级地震时,石碑塬 11~25 m 深范围内砂质黄土层(Q₃)由于地下水大幅度上升而引起液化,上覆土体沿缓斜坡坡降方向向前滑移了 1.5 km^[3]。

在上述液化实例中,液化层为干旱地区 Q₃ 风成黄土层,由于经历了农业灌溉或地下水大幅上升,遇地震而液化。而由于黄土独特的多孔隙、弱胶结的结构性和水敏性,饱和过程对其结构性的影响可能很大,也就是说经历了饱和过程的 Q₃ 黄土或许已不能再视为形成于第四纪晚更新世(Q₃)。本文以动三轴弯曲元试验设备对原状黄土饱和过程剪切波速进行跟踪测试,试图查明饱和过程对黄土结构性的影响。

另外,高国瑞^[7]发现兰州马兰黄土黏粒含量平均在 20%,最高达到 30%,但湿陷仍甚为强烈。进一步的研究表明兰州黄土中的黏粒表面活性为钙离子和微晶体碳酸钙所控制,普遍凝聚成集粒的结果^[8]。笔者在长期从事黄土探井取样及试验切削土样过程中,也发现黄土中有些黏粒是以黏土团块的形式存在,而黏土团块并不影响土体骨架。由于黏粒含量在黄土液化初判及详判中都极为重要^[9],因此对于该现象应引起足够的重视。

1 试验仪器及试样

1.1 试验仪器

本研究试验仪器为中国地震局工程力学研究所新近购置的英国 GDS 公司动三轴试验系统 DYN-TTS,试样底座和顶帽配备了压电陶瓷弯曲元,接、发弯曲元悬臂一端入土长度均为 2 mm,试验仪器如图 1、2 所示。相关弯曲元测试原理及剪切波形初至的判断方法参见文献^[10-12],这里不再赘述。

1.2 试样

兰州马兰黄土(Q₃)属干燥环境下的风力沉积物,地质年代介于 1×10⁴~10×10⁴ a,最大沉积厚度逾 35 m。试验用土取自兰州市寺儿沟、桃树坪小学及连搭乡场地,共计三组原状黄土试样。各试样取土深度及相应物性指标如表 1 所列。



图 1 动三轴试验系统 DYN-TTS
Fig.1 Dynamic triaxial test system DYN-TTS

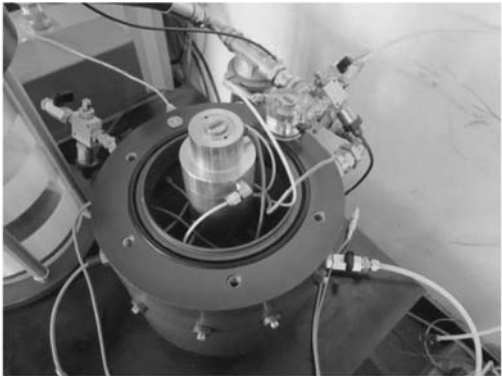


图 2 GDS 弯曲元
Fig.2 GDS bender elements

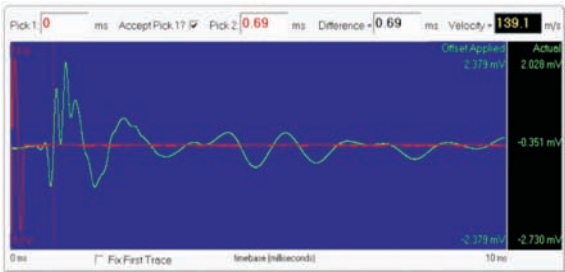
2 黄土饱和过程剪切波速跟踪测试

针对 1.2 节三组原状黄土制作直径 50 mm、长 100 mm 试样,以脱气水水位差循环渗流方法^[2-3]进行饱和。具体步骤为:试样装样、合轴、压力室注水之后测试试样初始状态剪切波速,然后对试样施加

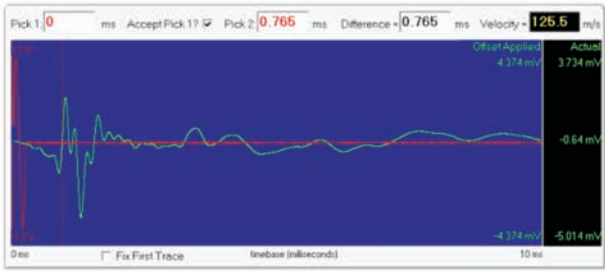
20 kPa 围压,通过 1.1~1.2 m 的水头使脱气水从试样底部进入,并使空气从试样顶部排出,饱和过程采用弯曲元设备连续测试剪切波速。图 3 为试样 LZ1-6 弯曲元测试剪切波形与波速结果,图 4 为三组试样跟踪测试结果。

表 1 原状黄土的物性指标
Table 1 Physical indexes of intact loess

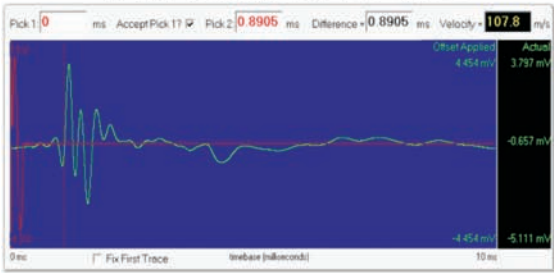
场地 编号	取土深 度/m	天然密度 /(g·cm ⁻³)	干密度 /(g·cm ⁻³)	含水 量/%	孔隙比	液限	塑限	塑性指数	黏粒含 量/%	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)
LZ1	6	1.5	1.39	8.3	0.935	22.4	15	7.4	16.9	37.6	27.8
LZ4	6	1.38	1.29	7	1.047	23.0	16.4	6.6	14.8	40.8	24.2
LZ6	6	1.48	1.37	8	0.941	22.5	15.8	6.7	19.6	21.1	32.9



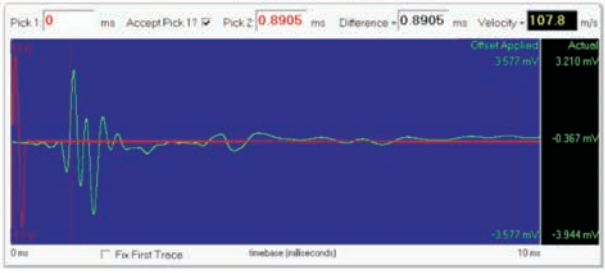
(a) 试样初始状态(无围压、未通水)



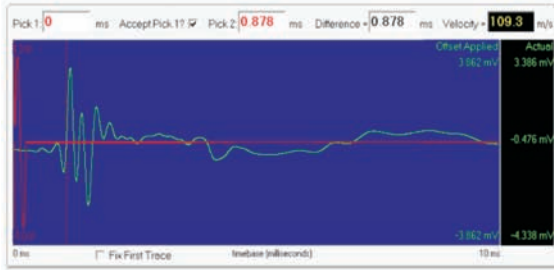
(b) 试样通水10 min



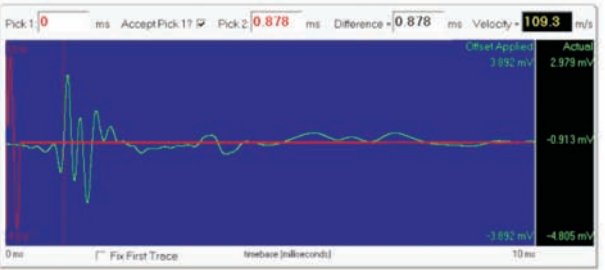
(c) 试样通水20 min



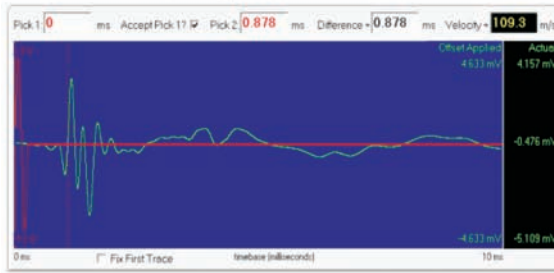
(d) 试样通水30 min



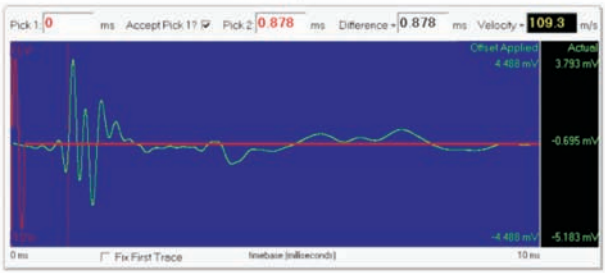
(e) 试样通水40 min



(f) 试样通水50 min



(g) 试样通水60 min



(h) 试样通水70 min

图 3 弯曲元试验的波形与波速结果

Fig.3 Shear wave forms and velocities in bender element tests

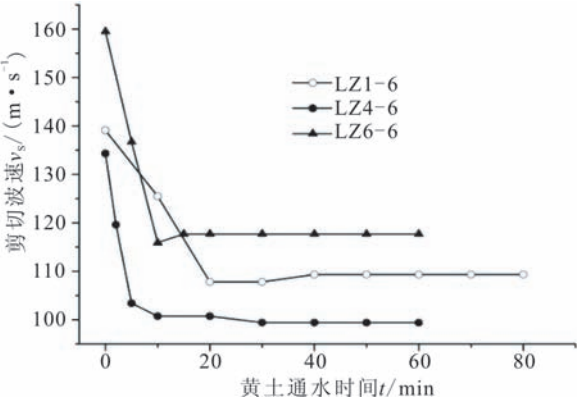


图 4 原状黄土饱和过程剪切波速跟踪测试结果

Fig.4 Shear wave velocity test results of intact loess during saturation

用剪切波速表征土体结构性有其优越性和合理性^[12]。从图 3~4 可见,原状黄土试样通水饱和,试样剪切波速在初始 10~20 min 内急剧下降,反映了黄土水敏性的特性;而当试样基本饱和之后,在 20 kPa 围压下重新固结,剪切波速甚至得到适当提高(LZ1-6、LZ6-6),反映了黄土遇水结构破坏到再固结的特性。试样 LZ4-6 无剪切波速下降后再提升的阶段,由表 1 可知其干密度为 1.29 g/cm³,非常小,这反映了黄土干密度对其水敏性强弱的影响。而不管其干密度大小,三组试样剪切波速最终都达到一个稳定的状态,证明黄土遇水、结构先破坏再固结形成新的稳定的结构。

在《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 修订说明中提及,规范地质年代液化初判准则被多次指出在黄土地区的历史地震黄土液化实例中不适用。究其原因,可能是概念理解上的差异。正如引言中所述的黄土液化实例,地质年代为 Q₃ 的风成黄土在经历了地下水位上升或农业灌溉之后才会液化,但经历过浸水的 Q₃ 风成黄土,由图 4 可知,其结构已产生显著的变化,不能再简单视其为形成于晚更新世(Q₃)时代。

3 黄土中黏粒赋存形式

正如引言中所述,黄土中黏粒赋存形式复杂。笔者在长期从事黄土探井取样及实验室黄土试样制备的过程中,发现黄土中有些黏粒是以黏土团块的形式存在(图 5)。

《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 规定粉土的黏粒含量百分率,Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度分别不小于 10、13 和 16 时,可判为不液化土^[1]。王兰民等^[9]则针对黄土提出相应烈度下黏粒含量界限为 12、15 和

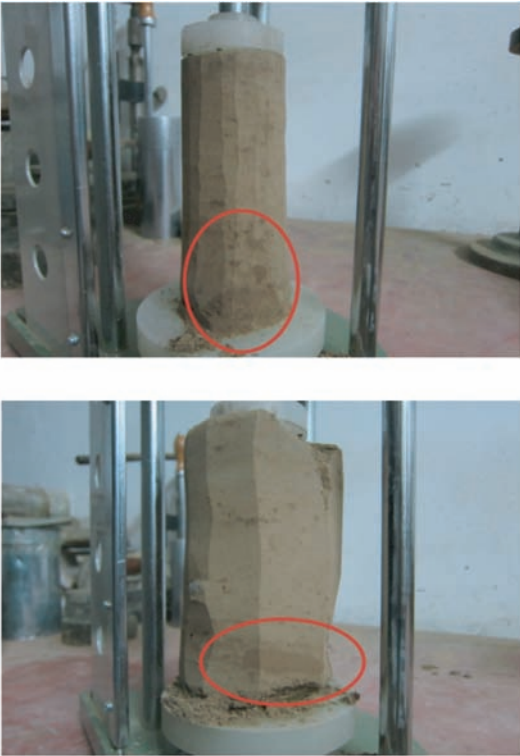


图 5 原状黄土中的黏土团块

Fig.5 Clay lumps in intact loess specimens

18,且在液化判别式中,还要考虑黏粒含量对土体标贯击数及抗液化强度的影响。而对于图 5 中黏粒赋存的形式,黏土团块并不影响土体其他部分粉质黄土的液化。因此,考虑该土样的黏粒含量应用于液化判别,应不计入黏土团块中的黏粒部分。相应的,自然界中土体成因复杂,并不排除其他地区粉土、砂土中黏粒以相同的形式存在,这就要求广大工程技术人员在应用土体黏粒含量指标时,对黏粒赋存形式给予一定的重视。

4 结语与建议

本文以动三轴弯曲元试验设备对原状黄土饱和过程剪切波速进行跟踪测试,并对黄土中黏粒赋存形式进行讨论,得出如下结论:

- (1) 原状黄土通水饱和,试样剪切波速在通水之后急剧下降,反映了黄土水敏性的特性。而当试样基本饱和之后,在 20 kPa 围压下重新固结,试样剪切波速最终达到一个稳定的状态,证明黄土遇水后结构先破坏、再固结形成新的稳定的结构。
- (2) 历史地震中地质年代为 Q₃ 的风成黄土在经历了地下水位上升或农业灌溉之后才会液化,经历过饱和的 Q₃ 风成黄土,不能再视其为形成于饱和前的地质年代。

(3) 黄土中有些黏粒是以黏土团块的形式出现,对于该种土的黏粒含量应用于液化判别,应不计入黏土团块中的黏粒部分。相应的,其他地区的粉土,也应区别其黏粒赋存形式。

参考文献(References)

- [1] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010, Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 王兰民, 石玉成, 刘旭, 等. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
WANG Lan-min, SHI Yu-cheng, LIU Xu, et al. Loess Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese)
- [3] 王兰民, 刘红玫, 李兰, 等. 饱和黄土液化机理与特性的试验研究[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)
- [4] 刘红玫, 袁中夏, 王峻. 基于内时理论的饱和黄土孔压增长模型的试验研究[J]. 西北地震学报, 2004, 26(4): 371-373.
LIU Hong-mei, YUAN Zhong-xia, WANG Jun. Laboratory Study Based on Endochronic Theory for Pore Water Pressure Increase of Saturated Loess[J]. Northwest Seismological Journal, 2004, 26(4): 371-373. (in Chinese)
- [5] 邓津, 王兰民, 程菊红, 等. 降低黄土液化势的改性技术分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 820-823.
DENG Jin, WANG Lan-min, CHENG Ju-hong, et al. Analysis of Modification Technique for Reducing Loess Liquefaction Potential[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 820-823. (in Chinese)
- [6] Ishihara K, Okusa S, Oyagi N, et al. Lequefaction Introduced Flow Slide in the Collapsible Loess Deposit in Soviet Tajik[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(4): 73-89.
- [7] 高国瑞. 兰州黄土显微结构和湿陷机理的探讨[J]. 兰州大学学报, 1979(2): 123-134.
GAO Guo-rui. Study of the Microstructures and Collapse Mechanism in Loess Soil From Lanzhou[J]. Journal of Lanzhou University, 1979(2): 123-134. (in Chinese)
- [8] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1-10.
GAO Guo-rui. A Structure Theory for Collapsing Deformation of Loess Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1-10. (in Chinese)
- [9] 王兰民, 袁中夏, 汪国烈. 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): 1-8.
WANG Lan-min, YUAN Zhong-xia, WANG Guo-lie. Study on Method for Preliminary and Detailed Evaluation on Liquefaction of Loess Sites[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 1-8. (in Chinese)
- [10] 姬美秀, 陈云敏, 黄博. 弯曲元试验高精度测试土样剪切波速方法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 732-736.
JI Mei-xiu, CHEN Yun-min, HUANG Bo. Method for Precisely Determining Shear Wave Velocity of Soil from Bender Element Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 732-736. (in Chinese)
- [11] 陈云敏, 周燕国, 黄博. 利用弯曲元测试砂土剪切模量的国际平行试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 874-880.
CHEN Yun-min, ZHOU Yan-guo, HUANG Bo. International Parallel Test on the Measurement of Shear Modulus of Sand Using Bender Elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 874-880. (in Chinese)
- [12] 周燕国. 土结构性的剪切波速表征及对动力特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
ZHOU Yan-guo. Shear Wave Velocity-based Characterization of Soil Structure and Its Effects on Dynamic Behavior[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)