

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.03.23

原状黄土遇水及饱和后软化特征研究

董林^{1,2}, 王兰民^{1,2}, 夏坤¹, 王峻¹

(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. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 黄土由于特殊的结构性导致其水敏性, 以往相关研究多采用室内试验的方法。文章以动三轴弯曲元试验系统对原状黄土和饱和黄土在各级围压下的剪切波速与轴向变形进行了测试, 并对兰州市西固区某饱和黄土场地进行了现场钻孔及原位试验。室内及现场试验结果表明, 黄土遇水模量软化, 饱和黄土更具有触变性。进一步对比饱和粉土与砂土的剪切波速与标贯击数统计关系, 发现饱和粉土由于触变性导致标贯击数较小, 而剪切波速为小应变无损测试, 最终表现为剪切波速相同的饱和粉土与砂土, 粉土标贯击数显著小于砂土。

关键词: 黄土; 水敏性; 触变性; 剪切波速; 标贯击数

中图分类号: P642.13⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)03-0148-05

A study of soften characteristics of wet and saturated loess

DONG Lin^{1,2}, WANG Lanmin^{1,2}, XIA Kun¹, WANG Jun¹

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

Abstract: Structural loess is water sensitivity, and previous studies are almost made by laboratory tests. Using cyclic triaxial apparatus along with the bender element system, shear-wave velocity and axial deformation of undisturbed loess and saturated loess were tested under different confining pressures. Furthermore, a borehole and in-situ tests were carried out at a saturated loess site in the Xigu district near Lanzhou. The laboratory and in-situ test results show that loess will soften during wetting, and saturated loess presents thixotropy. By comparing the statistical relationship between the shear-wave velocity and SPT blow count of saturated silts with that of sands, it is found that SPT blow count for saturated silts are small due to thixotropy, and the shear-wave velocity is a small strain and non-destructive test. For the saturated silt and sand with an identical shear-wave velocity, the SPT blow count of the saturated silt is significantly less than that of sand.

Keywords: loess; water sensitivity; thixotropy; shear-wave velocity; blow count of SPT

黄土对水具有高度的敏感性, 如黄土的含水量小于 10% 或达到最低缩限含水量时, 黄土是比较坚硬的, 而当含水量大于 10% 到液限含水量时, 黄土模量逐渐降低^[1~2]。童华炜等^[3]利用共振柱对西安黄土在增湿以后的动剪模量进行了试验分析, 得出在围压

100 kPa 和 200 kPa 时, G_{\max} 随饱和度增大显著下降, 而在围压 400 kPa 时, G_{\max} 随饱和度变化不大。

饱和砂土具有液化性, 饱和黏土具有触变性, 粉土性质介于二者之间^[4~5]。Boswell^[6]发现除了纯净砂以外, 只要土体中存在细颗粒, 都会呈现出触变性。而触变的诱因通常是机械作用, 如搅拌、振荡、冲击、夯压、

收稿日期: 2015-10-15; 修订日期: 2015-11-20

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)

通讯作者: 董林(1985-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: donglin408@163.com

波浪等。标准贯入试验即包括冲击、振荡,会诱发饱和和细粒土触变性,而剪切波速试验为小应变无损测试,土体表现为原状结构强度。

以往研究资料^[7]表明,剪切波速 V_s 与标贯击数 $N_{63.5}$ 一样均反映着土的软硬和松紧程度,所以两者之间存在着良好的相关关系。但考虑到饱和和细粒土的触变性,标贯击数与剪切波速所代表的力学意义明显不同。而黄土从颗粒组成上来说,含有大量细颗粒或基本都是细颗粒。本文利用动三轴仪对原状黄土和饱和黄土(由原状黄土饱和)进行了多级加载,并利用安装在动三轴仪中的弯曲元设备进行了各级围压下土样剪切波速测试,通过对比各级围压下饱和黄土与原状黄土剪切波速,试图查明原状黄土饱和和后软化程度。在兰州市西固区某饱和黄土场地进行了现场钻孔及原位试验,以标贯击数与剪切波速随含水量增大的变化趋势,以及通过与唐山、海城地震液化区砂、粉土剪切波速与标贯击数统计关系对比,探讨原状黄土遇水及饱和和后软化特征。

1 室内试验

1.1 试验仪器

试验仪器采用英国 GDS 公司动三轴试验系统 DYNNTS,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,试验仪器见图 1、2。本次试验输入的是激发频率为 5 kHz、电压幅值为 13 V 的正弦波,接收波形清晰可靠。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[8~10]。

表 1 原状黄土的物性指标

Table 1 Physical property indexes of the intact loess

场地编号	取土深度 /m	天然密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	干密度 ρ_d /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	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 /($^\circ$)
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

1.3 试验步骤

对上述两组原状黄土制作直径 50 mm、长 100 mm 试样,分别在天然含水量和饱和状态情况下,逐级施加 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 五级围压。黄土饱和采用脱气水水位差循环渗流方法^[1],试验参照《土工试验规程》^[11],以 5 min 内轴向变形不大于 0.005 mm 为固结稳定标准,固结稳定后测试试样剪切波速。为模拟现场 K_0 固结状态,试验偏压固结比 K_c 由下式确定:

$$K_c = \sigma_1 / \sigma_3 = 1 / K_0 \quad (1)$$



图 1 动三轴试验系统 DYNNTS
Fig. 1 DYNNTS dynamic triaxial test system

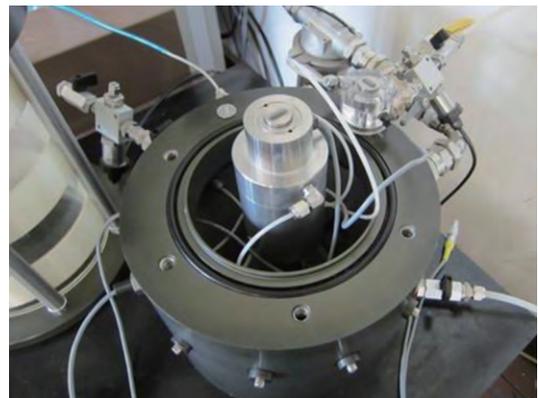


图 2 GDS 弯曲元
Fig. 2 GDS bender elements

1.2 试样

试验用土取自兰州市西固区寺儿沟村以及东岗镇桃树坪小学,共计两组原状黄土试样,试样取土深度及相应物性指标见表 1 所示。

$$K_0 = 1 - \sin\varphi \quad (2)$$

式中: σ_1, σ_3 —— 轴向和侧向固结应力 /kPa;

K_0 —— 静止侧压力系数;

φ —— 土的内摩擦角 /($^\circ$) (按表 1 所列)。

计算得到两组试样固结比 K_c 按表 1 顺序分别为 1.88 及 1.7。

1.4 弯曲元试验结果和分析

对原状黄土和试验饱和黄土进行逐级加载,每级荷载先加围压、再加轴向偏压,待试样固结稳定,使用弯曲元设备测试剪切波速,并记录试样轴向变形。限于篇幅,本文仅选择试样 LZ1-6 试验开始(天然含水

率、未加载)及试验结束(饱和状态、卸载)的弯曲元波形(图3)。两组试样各级围压下剪切波速及轴向变形测试结果见图4~5。

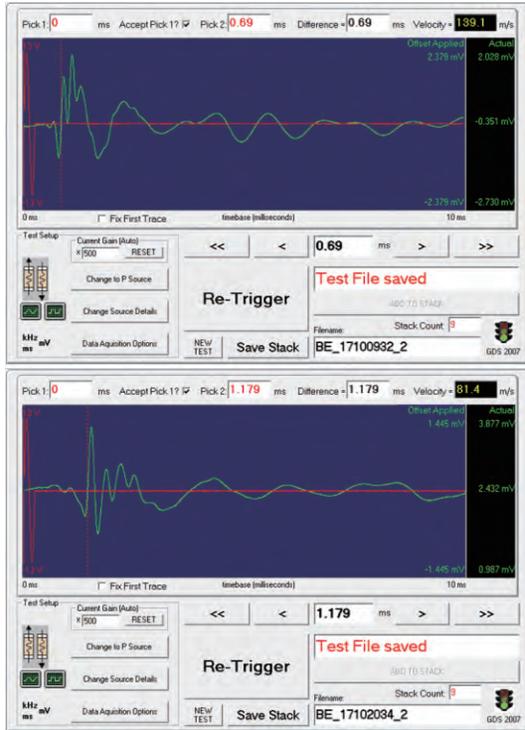


图3 弯曲元试验的典型波形与波速结果

Fig. 3 Typical shear-wave forms and velocities in bender element tests

值得注意的是,本文以内摩擦角计算试验偏压固结比,就是为尽量实现现场 K_0 固结状态,每级围压基本只体现固结的作用,而并不对试样产生破坏作用。试验每级围压施加之后,都是等到固结稳定再测试剪切波速。前一级围压虽产生试样应变,却并不是破坏性质的应变。图6为试样LZ1-6试验结束后的照片,左为原状黄土,右为饱和黄土,中间为原状黄土大偏压(K_0 为2.8)下相同试验过程的结果。可见试样既没产生鼓胀,也没有压裂。并且,本文目的是对比原状黄土和饱和黄土的力学表现,重点是对比相对值,而不是要获取绝对值。因此,可采用单个试样分级加载的方式。

从图4~5可见,饱和黄土相较原状黄土轴向变形大,体现了其湿陷性,而剪切波速则较小,体现了其水敏性。试样LZ4-6从围压50 kPa开始产生湿陷,而试样LZ1-6围压50 kPa没有湿陷、100 kPa开始湿陷,并且各级围压下试样LZ4-6湿陷量都较大。由表1可知,LZ1-6干密度 1.39 g/cm^3 ,而LZ4-6干密度 1.29 g/cm^3 ,体现了黄土干密度对其湿陷性的影响。围压从50 kPa增至400 kPa,饱和黄土与原状黄土剪

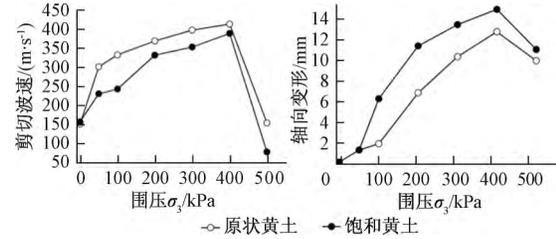


图4 试样LZ1-6测试结果

Fig. 4 Test results of loess sample LZ1-6

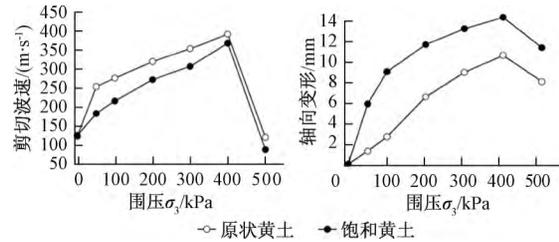


图5 试样LZ4-6测试结果

Fig. 5 Test results of loess sample LZ4-6



图6 试样LZ1-6试验结束的照片

Fig. 6 Photo of loess sample LZ1-6 after tests

切波速比值大致从0.73增至0.94,随着围压增大,饱和对黄土剪切波速的影响减小。饱和黄土卸载之后,两组剪切波速分别为 80.6 m/s 和 98.1 m/s ,而原状黄土卸载之后与加载之前剪切波速几乎相当,反应了原状黄土饱和后的软化特征。

2 现场试验与分析

2.1 饱和黄土场地现场试验

本文选取了兰州市西固区寺儿沟场地(试样LZ1-6取土地地),进行了现场钻孔测试。该场地地下水位27 m,水位以下为饱和黄土层,钻取岩芯样显示19 m以下黄土很湿。31 m以下为卵石层,本文不予考虑。

现场钻孔采用回转钻进的方式,并用岩芯管取样鉴别地层。自3 m以下每隔2 m进行一次标准贯入试验,待钻孔作业完成,以XG-I悬挂式波速测井仪进

行钻孔剪切波速测试,测试顺序自下而上,测点深度间隔 1 m。场地钻孔柱状图及现场标准贯入试验、剪切波速试验结果见图 7,其中标贯击数未经杆长修正。

由图 7 可见,19 m 以下黄土很湿直至饱和,剪切波速测试结果则显示 20 m 以下,黄土剪切波速随含水量增大而逐渐降低。水位以下饱和黄土,标贯击数显示大幅降低,与文献[12]研究结果吻合,而水位以下饱和黄土剪切波速也要明显低于水位以上黄土。

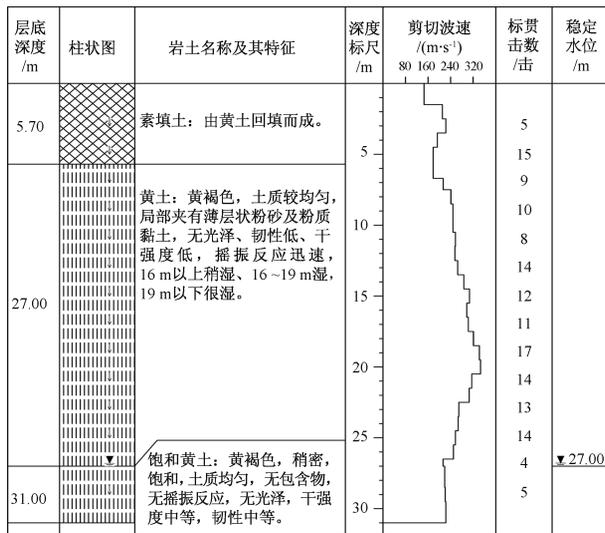


图 7 试样 LZ1-6 取土场地

Fig. 7 Borehole profile of sample LZ1-6 loess site

2.2 与砂土、粉土对比

类似于饱和砂土、粉土在地震作用下振动液化,饱和黄土也有很高的液化势与流动破坏势^[1,13-14]。本文为对比饱和黄土与饱和砂、粉土力学特性的差异,特选取唐山、海城地震两个液化地区的砂土和粉土的剪切波速(V_s)与标贯击数(N)统计关系:

下辽河平原砂土:

$$V_s = 85.34N^{0.346}, r = 0.80 \quad (3)$$

玉田、唐山砂土:

$$V_s = 92.1N^{0.284}, r = 0.60 \quad (4)$$

玉田、唐山粉土:

$$V_s = 90.45N^{0.399}, r = 0.88 \quad (5)$$

将上述 3 式以及图 7 中黄土剪切波速与标贯击数数据画入一张图(图 8)。

需要说明的是,唐山及下辽河平原地区地下水位较高,以上统计关系的原数据绝大多数为饱和砂、粉土数据。另外,以上数据多与液化判别有关,因此,标贯击数为未经杆长修正的实测数据。

对比图 8 中粉土与砂土统计曲线,粉土线明显高

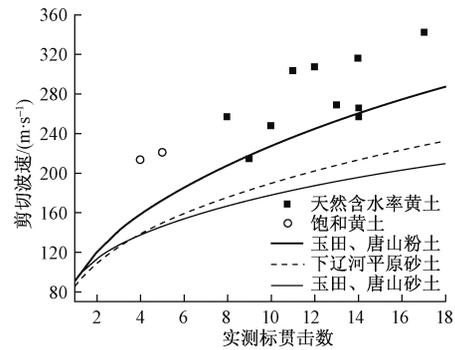


图 8 剪切波速与实测标贯击数统计关系

Fig. 8 Statistical relationships between shear-wave velocity and SPT blow count

于砂土线。正如引言中所述,只要土体中存在细颗粒,都会呈现出触变性。标准贯入试验易产生冲击、振荡,会导致饱和粉土发生触变性,土体软化。而剪切波速试验为小应变无损测试,粉土表现为原状结构强度。因此图 8 中粉土线明显高于砂土线,合理解释是,对于剪切波速相同的饱和粉土和砂土,由于粉土的触变性,粉土标贯击数显著小于砂土。

本文黄土试验数据有限,不能给出统计关系,但黄土散点位于粉土之上。首先,黄土孔隙比大,易表现出应变软化的特点,而饱和黄土兼具触变性,软化更甚。结合图 7 中剪切波速与标贯击数随深度变化趋势,19 m 以下剪切波速线性减小,黄土表现出水敏性的特点,但标贯击数并没有显著的降低,说明非饱和黄土基本没有表现出触变性,只有达到饱和状态,标贯击数才大幅下降。因此,一般现场黄土场地,饱和层以上非饱和黄土取样扰动小,在可接受范围内,而饱和黄土取样扰动大。

3 结论

(1) 饱和黄土相较原状黄土试样轴向变形更大,而剪切波速则较小。两组黄土湿陷起始压力不同,湿陷量也不同,黄土干密度大小起决定性作用。围压从 50 kPa 增至 400 kPa,饱和黄土剪切波速逐渐接近原状黄土,体现了随着围压增大,饱和对黄土剪切波速的影响减小。饱和黄土卸载之后,两组剪切波速均低于 100 m/s,而原状黄土卸载之后与加载之前剪切波速几乎相当,反应了原状黄土饱和后的软化特征。

(2) 标准贯入试验易产生冲击、振荡,会导致饱和粉土诱发触变性,土体软化。而剪切波速试验为小应变无损测试,粉土表现为原状结构强度。因此,对于剪切波速相同的饱和粉土和砂土,由于粉土的触变性,粉土标贯击数显著小于砂土。

(3) 本研究黄土剪切波速与标贯击数散点位于黄土统计曲线之上。黄土孔隙比大,易表现出应变软化的特点,而饱和黄土兼具触变性,软化更甚。

(4) 现场饱和黄土场地,当黄土很湿至饱和,剪切波速线性减小,但标贯击数并没有显著的降低,说明非饱和黄土基本没有表现出触变性,只有达到饱和状态,标贯击数才大幅下降。因此,一般现场黄土场地,饱和层以上非饱和黄土取样扰动小,而饱和黄土取样扰动大。

参考文献:

- [1] 王兰民,石玉成,刘旭,等.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003. [WANG L M, SHI Y C, LIU X, et al. Loess Dynamics [M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese)]
- [2] 骆亚生. 中国典型黄土动力特性及其参数的试验分析[D]. 西安:西安理工大学,2000. [LUO Y S. Test analysis of dynamic characteristic and parameter of some typical loess in China [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000. (in Chinese)]
- [3] 董华炜,朱博鸿. 增湿对黄土动剪模量及阻尼比的影响[C]//汪闻韶. 第三届全国土动力学学术会议文集. 上海:同济大学出版社,1990: 117-120. [TONG H W, ZHU B H. Effect of wetting on the loess dynamic shear modulus and damping ratio [C]// WANG W S. Proceedings of the Third National Soil Dynamics Conference. Shanghai: Tongji University Press, 1990: 117-120. (in Chinese)]
- [4] 冯秀丽,周松望,林霖,等. 现代黄河三角洲粉土触变性研究及其应用[J]. 中国海洋大学学报,2004, 34(6): 1053-1056. [FENG X L, ZHOU S W, LIN L, et al. The thixotropy of silt in Huanghe delta [J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(6): 1053-1056. (in Chinese)]
- [5] 徐永福,王驰,黄铭,等. 湿喷桩施工中饱和粉土的触变性研究[J]. 岩土工程学报,2013, 35(10): 1784-1789. [XU Y F, WANG C, HUANG M, et al. Thixotropy of saturated silty soils due to construction of DCM columns [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1784-1789. (in Chinese)]
- [6] Boswell P G H. A preliminary examination of the thixotropy of some sedimentary rocks [J]. Quarterly Journal of Geological Science, 1949, 104: 499-526.
- [7] 王广军,苏经宇. 剪切波速度统计结果及其在场地分类中的应用[J]. 建筑科学,1986(1): 69-76. [WANG G J, SU J Y. Some Statistical analytical

results of shear wave velocity and it's application in the site classification [J]. Building science, 1986 (1): 69-76. (in Chinese)]

- [8] 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 M X, CHEN Y M, HUANG B. 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)]
- [9] 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 Y M, ZHOU Y G, HUANG B. 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)]
- [10] 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 Y G. Shear wave velocity-based characterization of soil structure and its effects on dynamic behavior [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)]
- [11] SL237-017-1999 土工试验规程[S]. 1999. [SL237-017-1999 Soil test procedures [S]. 1999. (in Chinese)]
- [12] 董林,夏坤,郑龙. 甘肃地区波速测试中的问题分析[J]. 震灾防御技术,2013, 8(1): 81-89. [DONG L, XIA K, ZHENG L. Discussion of problem of wave velocity test in Gansu province [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8(1): 81-89. (in Chinese)]
- [13] 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): 54-57. [WANG J, WANG L M, WANG P, et al. A study of liquefaction characteristics of saturated loess in different regions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5): 54-57. (in Chinese)]
- [14] 王谦,王兰民,袁中夏,等. 汶川地震中甘肃清水田川黄土液化的试验研究[J]. 水文地质工程地质,2012, 39(2): 116-120. [WANG Q, WANG L M, YUAN Z X, et al. A study of loess liquefaction induced by the Wenchuan Ms8. 0 Earthquake in Tianchuan, Qingshui County, Gansu Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(2): 116-120. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华