

运用轻便动力触探仪研究黄土的岩土工程特性^{*}

Study on geotechnical properties of loess with the help of a portable dynamic penetrometer

周树华

(清华大学土木工程系, 北京, 100084)

魏兰英 伍法权 刘东生

(中国科学院地质研究所, 北京, 100029)

R. Gourves

(法国帕斯卡大学科学技术工程师学院 CUST, 法国克莱蒙 Clermont-Ferrand, 63174)

文 摘 运用可变能量轻便动力触探仪对黄土在天然状态及饱和状态下进行了一系列现场触探试验, 并结合该仪器开展了黄土天然状态下及饱和状态下的静力分级加载荷载试验。在这些试验所获结果基础上, 分析了黄土的岩土力学性质, 尤其是黄土的湿陷性。对比用其它手段测得的湿陷参数, 提出了一种运用触探仪现场测试黄土的力学强度, 进而运用所测的力学强度对黄土的湿陷性进行间接评价的简单方法。

关键词 动力触探仪, 黄土, 湿陷性, 岩土工程性质

中图法分类号 TU 413.5

作者简介 周树华, 男, 1967 年生, 博士后。1997 年法国帕斯卡大学获理学博士学位, 1997 年~ 1998 年在法国帕斯卡大学做博士后研究工作, 现为清华大学土木工程系在站博士后, 主要从事各类土体原位测试方面的研究及技术开发工作。

Zhou Shuhua

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Wei Lanying Wu Faquan Liu Dongsheng

(Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029)

R. Gourves

(CUST, University of Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 63174, France)

Abstract A series of tests have been carried out for loess in saturated and natural conditions respectively using a portable dynamic penetrometer with variable energy. Coupled with the apparatus, the static load tests were also performed on loess in same conditions. On the basis of the results obtained, the geotechnical properties of loess, especially its collapsibility are analyzed. Compared to other methods measuring the collapsibility index of loess, the authors proposed an indirect and simple method to evaluate the collapsibility of loess by measuring the mechanical resistance in situ with the penetrometer.

Key words dynamic penetrometer, loess, collapsibility, geotechnical characters

1 前 言^{*}

中国的黄土分布之广、深度之大和地层剖面之标准在全世界是独一无二的。对黄土的研究, 尤其是通过黄土研究来探索全球环境的演变, 具有非常重要的意义^[1]。许多外国知名学者和中国科学家对此作了大量的研究工作, 这里有必要提及的是 R·庞培利 (Pompelly, 1862~ 1865), F·V·李希霍芬 (Richthofen, 1865~ 1872), B·A·奥勃鲁契夫 (OpyeB, 1892~ 1894), B·维理士 (Willis, 1903~ 1904), P·德日进和杨钟健 (1930)^[2], 刘东生^[1], 张宗祜, 孙广忠等。

黄土是一种特殊土, 它容重小 ($1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$), 无层理, 以粉土颗粒为主要组成成分, 孔隙度高, 发育大孔构造和垂直节理, 遇水有不同程度的湿陷特征等特点。其岩土工程特性特殊, 有它自身的特点, 不能根据土的常规分类加以研究。

目前, 对黄土特别是西北黄土工程性质的研究, 已

开展了大量的工作^[2], 主要体现在以下几个方面:

a) 对黄土物理性质方面的研究, 主要包括对黄土的成分、组成、颗粒级配特别是粘土粒组含量、比重、天然含水量等性质的研究, 其中又以对这些参数的空间分布规律, 与其它参数的相关关系的研究为重点。

b) 对黄土力学工程性质方面的研究, 主要包括对黄土的塑性、干容重、膨胀性、压缩变形、抗剪强度、渗透性等性质的研究, 这主要体现在对这些参数的内在规律、与其它物理参数或力学参数的相关关系、荷载作用下的破坏机理、室内及现场测试等方面的研究。

c) 对黄土湿陷性的研究, 这是研究黄土工程性质的一个重要方面, 所以单独列出来。这方面的研究主要体现在对黄土湿陷性的机理、室内及现场测试、与其它参数的关系及对各类工程影响等方面的研究。

^{*} 国家教委回国人员研究启动基金、博士后基金及法国帕斯卡大学土木工程实验室资助项目

为了从不同的角度,运用不同的测试手段来研究黄土的岩土工程特性,自1995年以来,法国克莱蒙大学科学技术工程师学院和以刘东生为主的中国科学院地质研究所第四纪研究室合作研究中国黄土的岩土特性及其环境意义。该研究在于运用一种轻便动力触探仪现场测试黄土的力学强度,继而在分析所获触探曲线基础上研究黄土的工程性质。

2 轻便动力触探仪原理及现场试验

试验所采用的触探仪是一种法国产“熊猫牌”轻便可变量动力触探仪(图1),具有轻便、操作简单、自动化程度高、精度高等特点,它在吸收同类型动力触探仪优点基础上,采用可变轻巧动能装置取代笨重的势能装置,大大减轻了仪器的重量(总重量仅20 kg),提高了其灵活性、方便程度,是世界上第一台可变贯入能量动力触探仪^[3]。

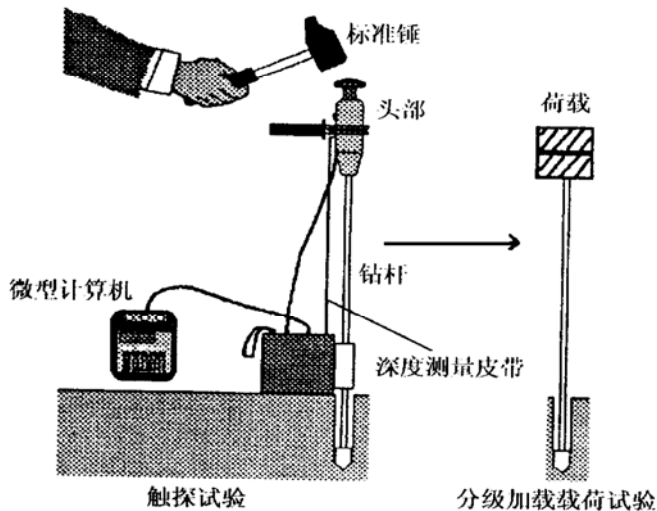


图1 可变量轻便动力触探仪的原理

Fig. 1 Principle of portable dynamic penetrometer with variable energy

仪器的主要原理在于用一个标准质量的重锤锤击探杆顶部的活塞,将锥形探头压入土内。对应于每次锤击,位于活塞内部的传感器立即测出冲击速度,电子记录器内计算机计算出贯入能量。与此同时,卷带盒内另一记录器记录锥形探头贯入的深度。根据这两个数据,运用传统的荷兰人公式(见式(1))便可立即计算出锥形探头的动力阻力 q_d 。所有这些数据均可被储存在记录器内,并可以在完成试验之后被传输到一PC机上,由仪器提供的相应软件进行处理^[4]。

$$q_d = \frac{\frac{1}{2} m \times l^2 / t^2}{Ae} \times \frac{m}{m + m'} \quad (1)$$

其中 q_d 为锥形探头的动力阻力, Pa; m 为标准重锤质量, kg; A 为锥形探头的截面积, m^2 ; e 为对应于每次

锤击的锥形探头贯入量, m; m' 为被锤击部分的质量, kg; l 为活塞内两测速传感器之间距离, m; t 为通过活塞内两测速传感器的时间, s。

该仪器的主要用途为对4~6 m深的浅层土进行勘探,检测各种回填土在施工期间和施工后的密实程度。此外,还可用该仪器对地下管道问题进行勘察,对挡土墙进行诊断,对积雪覆盖坡的稳定性进行研究。

3 黄土的特性试验结果分析

3.1 触探试验结果分析

运用触探仪,结合阶梯式开挖对同一黄土分别在自然条件和饱和条件下进行一系列触探试验,深度达10 m以上(见图2~4)。

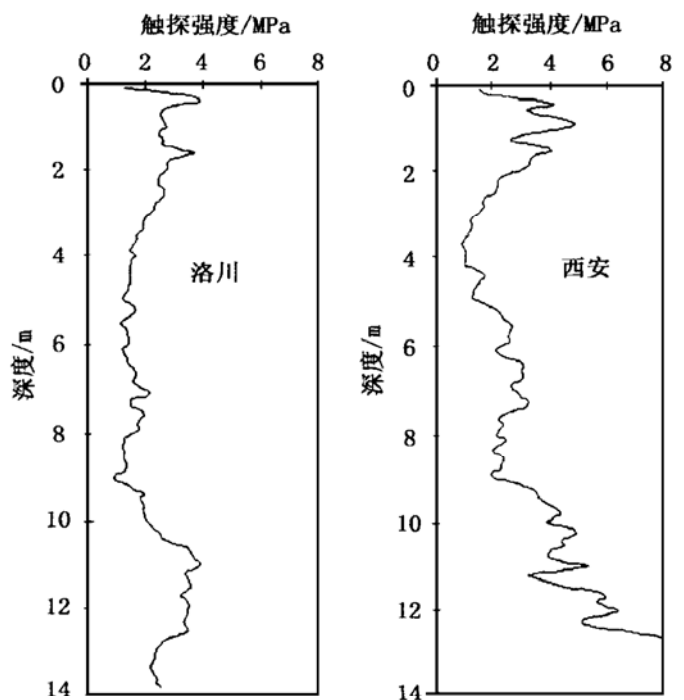


图2 在洛川及西安两地的触探曲线的对比

Fig. 2 Comparison of penetrometers obtained in Luochuan and in Xi'an

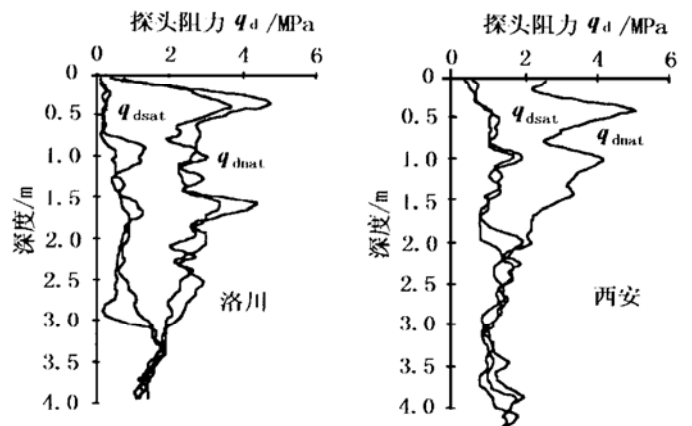


图3 同一黄土在自然条件下及饱和条件下触探曲线的对比

Fig. 3 Comparison of penetrometers for the same loess in saturated and natural conditions respectively

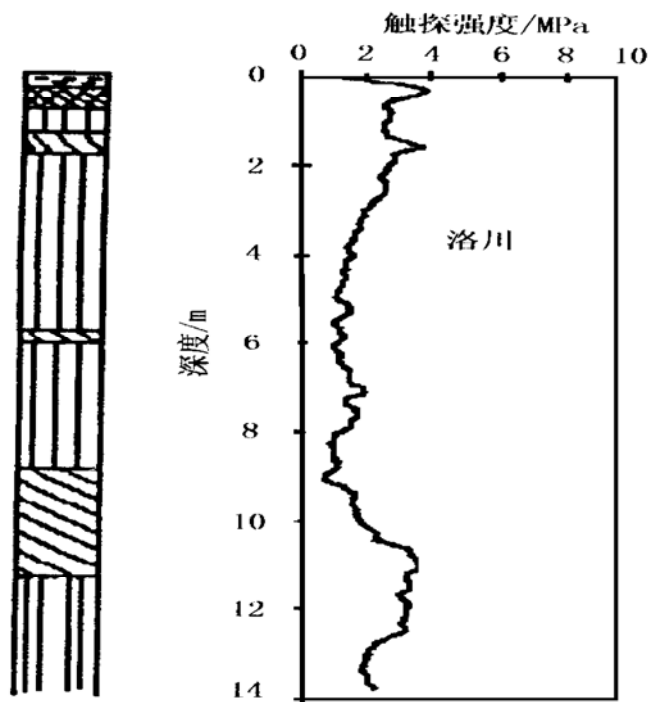


图4 触探曲线和地质柱状图

Fig. 4 Penetrograms and geologic column

通过这一系列触探试验,对黄土的岩土工程性质得出以下几点分析:

(1) 触探试验结果很好地揭示了黄土的成层性,触探曲线明显地表明了黄土的探头阻力 q_d 随深度的变化情况。

(2) 与传统的触探仪所测的触探曲线一样,可变量触探曲线也反映了地层在垂直方向上的变化,可以借助于触探曲线,结合地质剖面来建立地质柱状图(见图4)。

(3) 黄土的力学强度中等,一般为 1~4 MPa。

(4) 黄土的力学强度在水平及垂直方向上均具有一定的变化。

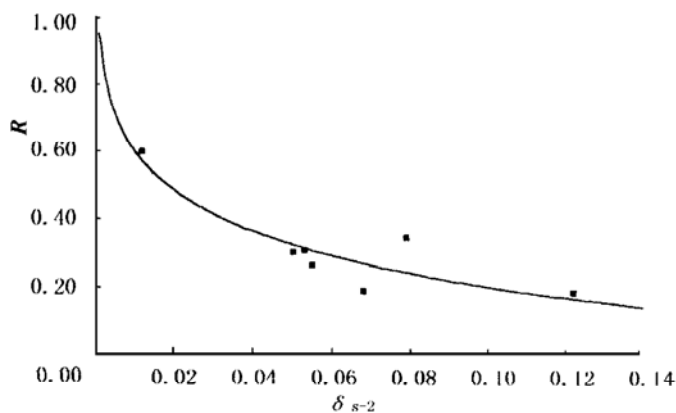
(5) 两地相距可能很远,但属于同一黄土地层,其触探曲线往往具有很好的对比性(图2)。

(6) 同一黄土,当其饱和后,其力学强度明显降低。

(7) 触探试验所测的探头阻力 q_d 及该参数在黄土处于自然条件下的值与黄土处于饱和条件下的值之比 q_{dnat}/q_{dsat} 与黄土的湿陷性系数 δ_{s-2} , δ_{s-3} 均具有很好的相关关系(图5),根据1995年~1996年期间进行的试验,我们得到以下相关关系: $q_d = 0.83(\delta_{s-2})^{-0.22} = 0.61(\delta_{s-3})^{-0.36}$; $R = q_{dsat}/q_{dnat} = -0.17\ln(\delta_{s-2})^{-0.19} = -0.33\ln(\delta_{s-3})^{-0.58}$ (q_d 单位: MPa)。

(8) 1996年~1997年期间的试验进一步验证了这几个参数之间的很好相关关系,而且我们可以从已经开展的工作初步得出以下结论:在自然条件下,探头阻力 $q_d < 1$ MPa 左右的黄土基本上是不湿陷的,探头阻力

$q_d > 4$ MPa 左右的黄土基本上是不湿陷的,探头阻力 q_d 介于 1~4 MPa 之间的黄土则可能是湿陷的也可能是不湿陷的,需要借助于其饱和条件下的触探试验或其它测试手段加以判断。

图5 系数 R 和湿陷系数 δ_{s-2} 的相关关系Fig. 5 Correlation between $R(q_{dsat}/q_{dnat})$ and δ_{s-2}

3.2 静力载荷试验结果分析

结合同一动力触探仪,进行正常触探试验,当钻杆达到一定深度的时候,取下钻杆上部设备,对黄土在自然条件和饱和条件下分别进行一系列的分级加载静力载荷试验^[5,6]。分级加载静力载荷试验程序,如图1所示。

通过一系列结合触探仪的分级加载静力载荷试验^[4](图6,图7),可以对黄土的岩土工程性质进行以下几个方面的评价:

(1) 通过这些试验获得的荷载-垂直位移曲线反映了在静力荷载作用下黄土很小变形情况下的变形表现。

(2) 参照 Gourves 及 Faugeras^[7,8] 对此类型的曲线极限压力 p_l , 弹性模量 E_{pn} 和蠕变压力 p_f 的定义,可以对黄土的这3个力学参数进行评价。

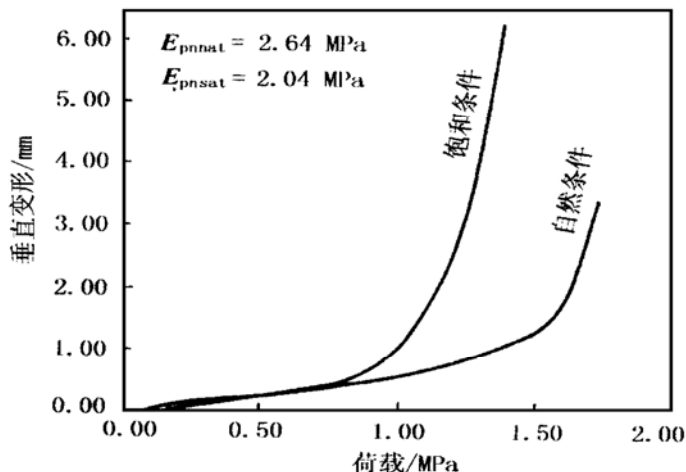


图6 结合触探仪进行黄土载荷试验结果

Fig. 6 Results of static load tests on loess coupled with penetrometer

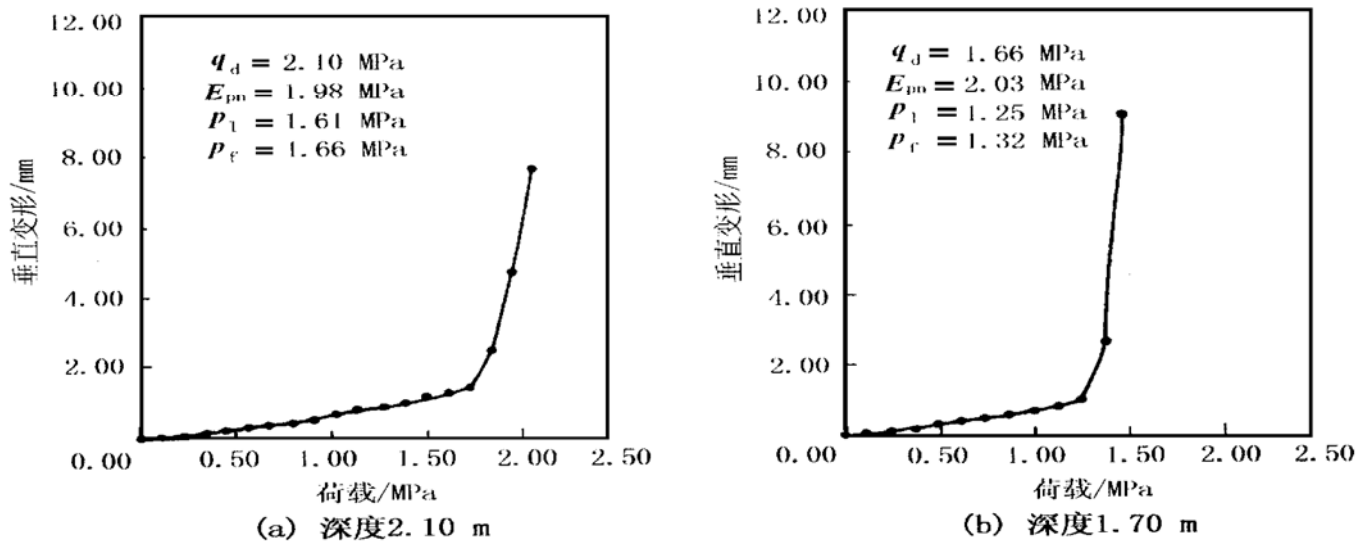


图7 黄土在自然条件下的静力荷载试验曲线

Fig. 7 Static load test curves for loess in natural conditions

(3) 根据试验所获曲线, 对黄土在自然条件下算得的这3个力学参数均高于在饱和条件下所测, 它们之间的比率反映了黄土的力学性质在饱和状态下和自然状态下的差异程度, 此外这3个参数之间及它们和触探试验所测的探头阻力 q_d 之间均具有很好的相关关系。

5 结 论

(1) 通过触探试验所获得的触探曲线, 结合地质剖面可以对黄土的地层进行划分, 不仅如此, 由于该触探曲线精度比较高(达到每3~5 mm一个数据), 可以把黄土地层划分到更小单元。

(2) 在触探试验的基础上, 结合触探仪可以开展分级加载静力载荷试验。

(3) 分别对黄土在自然条件和饱和条件下进行一系列这两种试验, 便可以对黄土的湿陷性进行评价。就已经获得的初步成果来看, 运用触探仪现场测试黄土的湿陷性是完全可以行的, 这将使得黄土湿陷性的测试更加精确、更加方便。更加精确, 因为它是一种现场测试; 更加方便, 因为它可以代替室内测试的繁琐及取样的高要求。当然, 该结果仅是初步的, 有待进一步的研究工作。

参 考 文 献

- 1 Liu Tungsheng et al. Loess and the environment. Beijing: China Ocean Press. 1985. 251
- 2 孙广忠. 西北黄土的工程地质力学特性及地质工程问题研究. 兰州: 兰州大学出版社, 1989
- 3 周树华. 一种新型的动力触探仪. 工程勘察, 1997, 1: 73
- 4 Zhou S. Characterization of subsurface soil with the help of portable dynamic penetrometer with variable energy of type Panda: [Ph D thesis] (in French). France: Blaise Pascal University, 1997
- 5 Grand P. Characterization of the Chinese loess in China: [Master thesis]. Clermont-Ferrand and Beijing: CUST and Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 1996
- 6 Rivaud P. In situ study of the loess of China using the Panda apparatus: [Master thesis]. Clermont-Ferrand and Beijing: CUST and Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 1997
- 7 Faugeras J C. L'essai de compressibilité des sols au pénétromètre statique et son interprétation sur modèle analogue: [Ph D thesis]. France: University of Paul Sabatier de Toulouse, 1979
- 8 Faugeras J C. Fortuna G. Gourvès R. Mesure de la compressibilité des sols à l'aide du pénétromètre statique, Essai en place, Symposium International, Paris, 1983, 2: 269~274