

低液限黏土静力触探模型试验研究

周文渊, 宋新江, 徐海波, 钱财富, 吴杰

(安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 通过低液限黏土的静力触探模型试验, 揭示锥尖阻力、侧摩阻力、比贯入阻力、土体干密度、含水率等参数之间的关系及变化规律。试验结果表明: 锥尖阻力与比贯入阻力之间具有较好的相关关系, 锥尖阻力约为比贯入阻力的0.86~0.92倍; 探头周围土体受力作用机理的改变是产生临界深度的主要原因; 对于相同含水率, 直角坐标系内锥尖阻力与干密度之间为对数关系, 两者取对数后为线性关系; 对于相同干密度, 锥尖阻力随含水率的减小而增大, 但锥尖阻力与含水率的线性关系随干密度的增大逐步减弱。

关键词: 静力触探; 模型试验; 锥尖阻力; 干密度; 含水率

中图分类号: TU413 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1110-04

Cone penetration model test on clay with low liquid limit

ZHOU Wen yuan, SONG Xin jiang, XU Hai bo, Qian Cai fu, WU Jie

(Anhui Huaihe River Water Resources Research Institute, Bengbu 233000, China)

Abstract: Form the static cone penetration model test of clay with low liquid limit, the relationships among the tip resistance, side friction, specific penetration resistance, dry density, and water content were determined as well as the variation law of the above parameters. The results showed that (1) the tip resistance has good correlation with the specific penetration resistance, and the tip resistance is 0.86~0.92 times of the specific penetration resistance; (2) variation of the stress mechanism for the surrounding soil of probe is the main reason for the generation of critical depth; (3) under the same water content, the tip resistance has a logarithmic relationship with the dry density in the rectangular coordinate system, and there is a linear relationship between log tip resistance and log dry density; and (4) under the same dry density, the tip resistance has a negative correlation with water content, and the linear relationship between the tip resistance and water content becomes weaker with the increasing of dry density.

Key words: cone penetration test; model test; tip resistance; dry density; water content

静力触探试验是工程中广泛使用的一种原位测试方法, 可用于土层划分, 估算地基承载力、桩体承载力和土体物理学参数, 判别土体液化和压实填土质量等^[1-9]。现场试验由于地质条件的复杂性, 不适用于研究单个参数对静探成果的影响程度, 而模型试验则较好的解决了上述问题。

静力触探模型试验是将现场原型试验按比例缩小的一种室内试验, 与现场原型试验相比, 具有试验历时短、能模拟不同工况(如相同含水率、不同材料界面等)、费用低等优点, 有助于揭示静力触探贯入机理、土体应力分布与变形规律、孔隙水压力消散程度、静力触探参数与土体密度、含水率等参数之间的关系等。

静力触探模型试验最先应用于铁路领域, 1984年, 铁道部成立的静力触探协作组^[10]开展了不同密度砂土的静力触探室内模型试验, 分析了静力触探过程中探头阻力和探头附近土体的应力与变形, 为揭示触探贯入机理奠定了基础; 夏增明^[11]根据砂土静力触探室内模型试验探头贯入过程中土层的附加应力和变形规律, 揭示了静力触探贯入机理, 对静力触探曲线反映出的自由表面效应、深度效应和层位界面效应的机理特性进行深入分析; 刘仕顺^[12]采用相似理论推导了中粗砂相对密度的模型试验与现场试验之间的相似系数; 刘仰韶^[13]通过中粗砂轻型动力触探室内模型试验和有限元分析, 揭示了轻型动力触探在回填中粗砂的作用机理;

收稿日期: 2014-12-31 修回日期: 2015-07-17 网络出版时间: 2015-12-01

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151201.0856.002.html>

基金项目: 水利部科技推广计划项目(TG1414); 水利部公益性行业科研专项(201401022; 201101012); 安徽省自然科学基金项目(148085M E99)

作者简介: 周文渊(1988-), 男, 河南沈丘人, 助理工程师, 主要从事岩土工程试验研究。E-mail: 57408817@99.com

通讯作者: 宋新江(1970-), 男, 安徽滁州人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事岩土力学与堤坝工程试验研究。E-mail: sxj06@163.com

田卿燕^[4]验证了型动力触探法与静力触探法在检测粗砂相对密度时存在较好的相关性;蒋明镜^[15]研制了一套可以在模型箱水平面内任意位置进行贯入试验的静力触探模型试验装置,可用于模拟月壤静力触探力学特性的研究。目前,静力触探模型试验主要研究对象为砂土;而对于低液限黏土、黏土来说,由于土体结构性、填筑不均匀性等因素的影响,研究成果仍比较少。本文对低液限黏土开展静力触探模型试验,研究锥尖阻力、比贯入阻力、摩擦比与土体含水率、干密度等参数之间的关系以及贯入临界深度。

1 试验装置

静力触探试验模型槽:槽身由三段长方体和底板组成,每段尺寸为1 816 m(长)×0 916 m(宽)×0 6 m(高),制作材料全部为Q235 碳素钢,钢板厚16 mm。模型槽对接处、盖板与模型槽接缝处均放置密封橡胶垫圈,防止试验过程中土样水

表1 土的基本物理力学性质

Tab.1 Basic physical and mechanical properties of soil

指标名称	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数	粒径/mm			最大干密度值 / (g·cm ⁻³)	最优含水率 (%)
				砂粒> 0.05 (%)	粉粒0.05~ 0.005 (%)	黏粒< 0.005 (%)		
指标值	33.5	18.8	14.7	7.0	81.0	12.0	1.60	19.0

2.2 试验方案

模型试验共计五组,其中第一组和第二组模型土体的含水率为12%,第三组、第四组和第五组模型土体的含水率分别为14%、19%和21%。土体填筑完毕,静置24 h后进行单桥和双桥静力触探试验。

3 试验成果分析

3.1 模型槽静力触探成果

图1为双桥静力触探试验锥尖阻力和侧摩阻力曲线;图2为单桥静力触探试验比贯入阻力曲线;图3为锥尖阻力与比贯入阻力之间的关系。

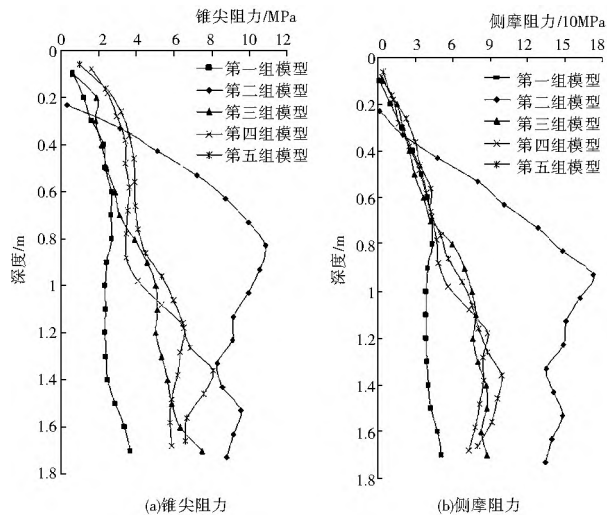


图1 双桥静力触探试验曲线

Fig.1 Curves of double bridge cone penetration test

从图1和图2可以看出,双桥静力触探试验锥尖阻力随深度的变化趋势与单桥静力触探试验比贯入阻力随深度的变化趋势基本相同,且与各组模型土样室内试验成果测得的干密度变化基本一致,揭示了锥尖阻力、比贯入阻力与干密

分流失,保证具有良好的密闭性。静力触探装置为江苏省如皋市大地仪器有限公司生产的2Y-20E型静力触探系统。

2 土料制备与试验方案

2.1 土料制备

试验土料为低液限黏土,土料基本物理力学性质见表1。土料过5 mm筛,每次称取约900 kg土体倒入铝塑板上,根据要配置的含水率计算加水量;用喷雾器将水均匀喷洒至土体表面;人工拌匀后,盖上塑料薄膜,润湿一昼夜;按以上方法分批制备土料,直至土料满足一组模型试验为止。

将制备好的土料分18次倒入模型槽,每次根据制备的干密度值称取土体质量,并进行人工夯实,使每次夯实的厚度达到10 cm,土层交接面进行刨毛处理,增加土层间的粘接程度。

度之间具有一定的相关关系。图3所示,锥尖阻力与比贯入阻力之间具有良好的线性关系,五组模型试验的相关系数均在0.97以上,锥尖阻力约为比贯入阻力的0.86~0.92倍。

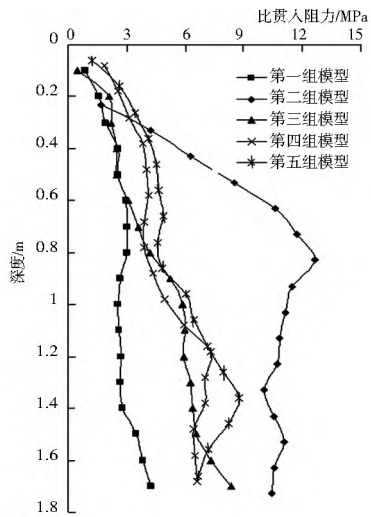


图2 单桥静力触探试验曲线

Fig.2 Curves of single bridge cone penetration test

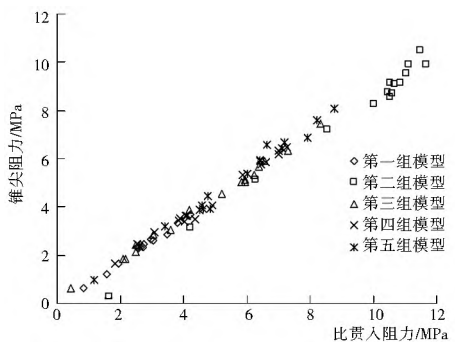


图3 锥尖阻力与比贯入阻力的关系

Fig.3 Relationship between the probe resistance and specific penetration resistance

研究表明,探头贯入初始阶段,探头附近的土体主要受剪切作用,土体应力向水平方向和上部传递,探头上部较小的上覆土层压力加剧了应力的扩散程度,使得图 1 和图 2 中上部土体测得的锥尖阻力或比贯入阻力偏小;随着深度的增加,土体上覆土层压力逐渐增大,当达到某一深度以下,土体由受剪切作用逐步过渡到以压缩作用为主,测得的锥尖阻力或比贯入阻力接近土体的真实值,该深度即为静力触探试验的临界深度。根据图 1 和图 2 及相关研究成果,低液限黏土的临界深度取为 0.6 m。

3.2 室内试验成果

静力触探试验结束后,利用环刀对模型槽内上部填筑土体进行分层取样,测定每层土体的密度、含水率,并计算土体的干密度,试验计算结果见表 2。

表 2 室内试验结果
Tab. 2 Results of laboratory test

模型试验组次	土体深度/m	平均天然密度/(g·cm ³)	平均干密度/(g·cm ³)	平均含水率(%)
第一组	0.20	1.55	1.37	11.6
	0.35	1.57	1.41	11.7
	0.80	1.56	1.41	12.3
	1.05	1.58	1.40	12.4
	1.30	1.58	1.40	12.3
	1.60	1.62	1.43	12.4
第二组	0.35	1.75	1.55	12.4
	0.60	1.78	1.57	12.7
	0.83	1.79	1.59	12.3
	1.10	1.76	1.57	11.8
	1.30	1.71	1.53	11.4
	1.50	1.72	1.53	12.2
第三组	0.13	1.61	1.42	13.1
	0.40	1.62	1.42	14.1
	0.70	1.64	1.44	13.9
	1.00	1.71	1.50	13.8
	1.20	1.72	1.51	13.5
	1.40	1.72	1.51	13.7
第四组	1.60	1.74	1.53	13.8
	0.40	1.77	1.50	17.8
	0.60	1.80	1.51	19.1
	0.80	1.78	1.50	18.8
	1.00	1.80	1.51	18.9
	1.20	1.86	1.56	19.4
第五组	1.40	1.84	1.55	18.9
	1.60	1.83	1.52	19.3
	0.20	1.87	1.57	19.3
	0.40	1.84	1.54	19.7
	0.60	1.86	1.54	20.7
	0.80	1.88	1.56	20.4
1.00	1.91	1.58	21.0	
1.20	1.92	1.59	20.5	
1.40	1.94	1.61	20.6	
1.60	1.93	1.59	21.4	

从表 2 中可知,同一组模型不同深度土样的含水率略有不同,但含水率相对误差基本在 1% 以内,可近似认为同一组

模型具有相同的含水率;五组模型试验土体的平均含水率分别为 12.0% (第一、二组)、13.7%、18.7% 和 20.6%。

3.3 相同含水率条件下静力触探参数与干密度的关系

由于临界深度以上的静力触探试验成果未真实反映土体的实际状态,因此,本次主要分析临界深度以下的静力触探试验参数与干密度的关系。图 4 为直角坐标系和双对数坐标系内的锥尖阻力与干密度的关系。

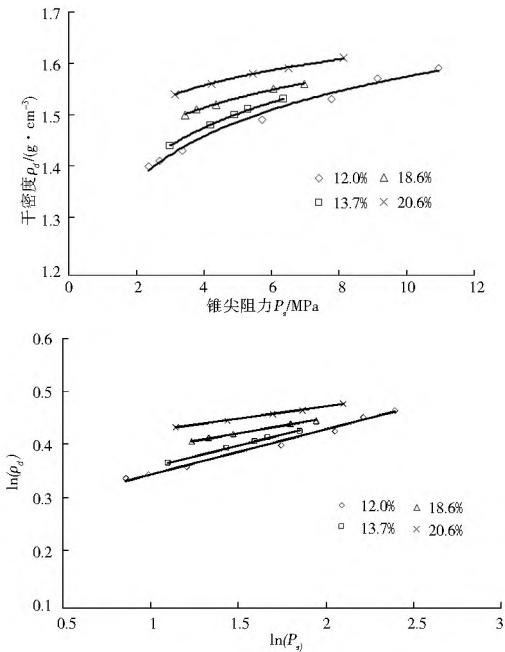


图 4 锥尖阻力与干密度的关系

Fig. 4 Relationship between the probe resistance and dry density

由图 4 知,直角坐标系内四种含水率的锥尖阻力和干密度均呈对数关系;对于相同含水率,锥尖阻力随干密度值的增大而增大,并有接近于一定值的趋势,但锥尖阻力变化增量随干密度的增大而减小。对于同一含水率,单位体积内的孔隙体积决定了土体干密度的大小,孔隙体积越小干密度越大,反之孔隙体积越大干密度越小,当孔隙全部被土颗粒填满时达到干密度理论上的最大值,反映在图中即锥尖阻力有接近于一定值的趋势。干密度与锥尖阻力取对数后,四种含水率的锥尖阻力与干密度呈线性关系,含水率 12.1%、13.7%、18.7% 和 20.6% 对应的直线斜率和截距分别为 0.085 0、0.081 6、0.055 7、0.046 2 和 0.259、0.275、0.337、0.337,即直线斜率随含水率的增大而减小,截距随含水率的增大而增大。

3.4 相同干密度条件下锥尖阻力与含水率的关系

图 5 为 1.50 g/cm³、1.54 g/cm³ 和 1.58 g/cm³ 三种干密度条件下的锥尖阻力与含水率之间的关系。

相同干密度条件下,锥尖阻力随含水率的减小而增大,其变化增量亦增大,如中干密度为 1.50 g/cm³ 的土体,含水率 13.8% 对应的锥尖阻力约为含水率 20.6% 的 3 倍;干密度为 1.54 g/cm³ 的土体,含水率 12.1% 对应的锥尖阻力约为含水率 20.6% 的 2.5 倍;随着干密度的增大,含水率对锥尖阻力的影响逐步减小,两者之间的线性关系逐步减弱。

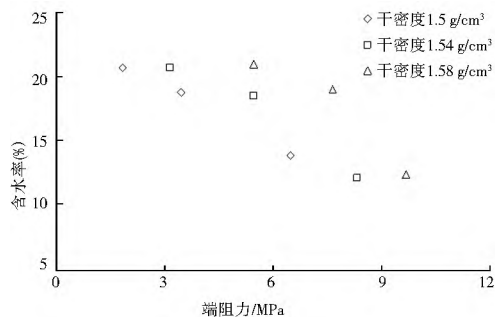


图5 锥尖阻力与含水率的关系

Fig. 5 Relationship between the probe resistance and water content

4 小结

(1) 双桥静力触探试验测得的锥尖阻力与单桥静力触探试验测得的比贯入阻力之间具有良好的线性关系, 锥头阻力约为比贯入阻力的 0.86~0.92 倍。

(2) 贯入过程中, 由于探头周边土体作用机理的改变, 静力触探试验存在一个临界深度, 对于低液限黏土而言, 建议取 0.6 m。

(3) 对于相同含水率, 直角坐标系内锥尖阻力与干密度呈对数关系, 随干密度值的增大而增大, 并有接近于一定值的趋势; 锥尖阻力与干密度取对数后, 两者呈线性关系, 斜率随含水率的增大而减小, 截距随含水率的增大而增大。

(4) 对于相同干密度, 锥尖阻力随含水率的减小而增大, 其变化增量亦增大; 随着干密度的增大, 含水率对锥尖阻力的影响逐步减小, 两者之间的线性关系逐步减弱。

参考文献 (References):

- [1] 徐海波, 宋新江, 钱财富. 静力触探法研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 78-81. (XU Hai bo, SONG Xing jiang, QIAN Cai fu. Research review on static cone penetration test [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 78-81. (in Chinese))
- [2] 狄圣杰, 单治钢, 梁正峰. 基于 CPT 的近海地层土性分类浅析及应用研究[J]. 工程勘察, 2014, 11: 1-4, 23. (DI Sheng jie, SHAN Zhi gang, LIANG Zheng feng. Analysis on offshore soil classification based on CPT and its application [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 11: 1-4, 23. (in Chinese))
- [3] 李鹏, 许再良, 李国和. 基于静力触探的不同压力段土体压缩模量确定方法研究[J]. 工程勘察, 2013(11): 5-9, 20. (LI Peng, XU Zai liang, LI Guo he. Estimation of soil compression modulus under different stress states based on cone penetration test [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(11): 5-9, 20. (in Chinese))
- [4] 王君鹏, 沈水龙. 基于孔压静力触探确定土体的渗透系数[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3335-3339. (WANG Jun peng, SHEN Shui long. Determination of permeability coefficient of soil based on CPTU [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3335-3339. (in Chinese))
- [5] 胡锡进, 杨迎晓. 杭州粉土和黏土静力触探参数与物理力学性质对比[J]. 浙江树人大学学报, 2012, 12(3): 34-38. (HU Xi jin, YANG Ying xiao. Comparative study of the cone penetration test parameter and the physical and mechanical properties of Hangzhou Silt and Clay [J]. Journal of Zhejiang Shuren University, 2012, 12(3): 34-38. (in Chinese))

- [6] 苗永红, 刘刚. 基于 CPTU 测试数据管桩承载力预测新方法[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2014, 31(5): 66-70. (MIAO Yong hong, LIU Gang. CPTU based new method for prediction of pipe pile bearing capacity [J]. Journal of Guizhou University, Natural Sciences, 2014, 31(5): 66-70. (in Chinese))
- [7] 张浩. 上海地区基于静力触探的液化判别分析[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(2): 46-49, 55. (ZHANG Hao. Study on technological standard for submarine geological sampling [J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(2): 46-49, 55. (in Chinese))
- [8] 吴玉财, 胡利平, 李国维. 改进静力触探法检测水泥搅拌桩试验研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(7): 7-13. (WU Yu cai, HU Li ping, LI Guo wei. Experimental research on detecting cement mixed pile by modified static cone penetration [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(7): 7-13. (in Chinese))
- [9] 徐亮, 翟剑锋, 吉同元. 某码头后方堆场强夯效果检测试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增刊): 1981-1983, 1995. (XU Liang, ZHAI Jian feng, JI Tong yuan. Experimental analysis on the effect of dynamic compaction of the rear storage yard in a wharf construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(Supplement): 1981-1983, 1995. (in Chinese))
- [10] 静力触探协作试验组. 砂类土静力触探机理的模型实验[J]. 长沙铁道学院学报, 1984(1): 1-10. CPT Group Cooperation. Model Test on CPT Mechanism of Sand [J]. Journal of Changsha Railway University, 1984(1): 1-10. (in Chinese))
- [11] 夏增明, 蒋崇伦, 孙渝文. 静力触探模型试验及机理分析[J]. 长沙铁道学院学报, 1990, 8(3): 1-10. (XIA Zeng ming, JIANG Chong lun, SUN Yu wen. The model experiment and analysis of the mechanism in static penetration test [J]. Journal of Changsha Railway University, 1990, 8(3): 1-10. (in Chinese))
- [12] 刘仕顺, 吕建兵, 田卿燕. 桥涵台背回填中粗砂检测模型试验相似分析[J]. 公路与汽运, 2005(3): 115-118. (LIU Shi shun, LV Jian bing, TIAN Qing yan. Similarity analysis of detection model test on backfill medium coarse sand in back of bridges and culverts [J]. Highways and automotive applications, 2005, 3: 115-118. (in Chinese))
- [13] 刘仰韶, 田卿燕, 吕建兵. 轻型动力触探检测公路桥涵台背回填中粗砂的试验方法研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(12): 67-70. (LIU Yang shao, TIAN Qing yan, LV Jian bing. Study on the light dynamic penetration to test coarse sand in bridge sand filling [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(12): 67-70.
- [14] 田卿燕, 刘仰韶, 吕建兵. 轻型动力触探法与静力触探法检测粗砂相对密实度的相关性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2747-2752. (TIAN Qing yan, LIU Yang shao, LYU Jian bing. Correlation study of light dynamic penetration test and cone penetration test in testing coarse sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2747-2752. (in Chinese))
- [15] 蒋明镜, 戴永生, 王新新. 一种静力触探模型箱试验装置的研制及其试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2109-2117. (JIANG Ming jing, DAI Yong sheng, WANG Xin xin. Development of a calibration chamber for cone penetration test and corresponding experimental research [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 2109-2117. (in Chinese))