

# 上海地区土体灵敏度的研究

樊向阳<sup>1,2</sup> 顾国荣<sup>1</sup> 黄宏伟<sup>2</sup>

(1. 上海岩土工程勘察设计院有限公司, 上海 200002; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**【摘要】** 介绍了土体灵敏度的概念, 提出了用单桥静力触探和双桥静力触探测定的侧摩阻力的比值来确定土体灵敏度的方法。在大量试验数据的基础上, 对用几种不同方法测定的上海地区浅部各土层土体灵敏度进行了统计分析, 给出了各土层灵敏度的推荐值。

**【关键词】** 土体灵敏度; 无侧限抗压强度; 十字板抗剪强度; 静力触探侧摩阻力

**【中图分类号】** TU 473.1

## Study on Soil Sensitivity in Shanghai Region

Fan Xiangyang<sup>1,2</sup> Gu Guorong<sup>1</sup> Huang Hongwei<sup>2</sup>

(1. Shanghai Geotechnical Investigation & Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200002;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 China)

**【Abstract】** The concept of soil sensitivity is introduced briefly. The method of measuring soil sensitivity by the ratio of side friction resistances from single bridge and double bridge cone penetration test is put forward for the first time. Based on a great deal of test data, to shallow strata in Shanghai, the soils sensitivity determined by several methods are counted and analyzed. The recommendatory values of soils sensitivity are given in the end.

**【Key Words】** soil sensitivity; unconfined compression strength; vane strength; side friction resistance of cone penetration test

### 0 引言

土体灵敏度是反应土的强度由于结构受到破坏而降低的程度, 它对判定土层成因、结构以及扰动对软弱土层强度的影响是有用的, 特别是了解土层破坏后残余强度的大小具有实用价值。

粘性土的性质与其结构是否被扰动有密切关系。土的性质受结构扰动的影响而改变的特性, 称为土的结构性。粘性土是具有结构性的土, 而砂土和碎石土则一般不具有结构性。粘性土结构性的强弱用灵敏度来表示。随着基坑工程、地铁隧道工程及桩基工程的发展, 土的结构性已越来越引起人们的重视。在某些重大工程中, 土的灵敏度也成了勘察报告的内容之一。但是, 迄今为止很少有人对土体灵敏度做过规律性的研究。

### 1 土体灵敏度的试验测定

现在测试土体灵敏度的最常用的方法有室内土工试验法和十字板剪切试验法两种。近年来随着双桥静力触探试验的广泛应用, 通过静力触探试验来研究粘性土灵敏度的方法也具有一定的实用价值。

#### 1.1 室内土工试验法

室内土工试验法是通过测定土的无侧限抗压强

度来确定土体灵敏度的<sup>[1]</sup>:

$$S_t = q_u / q_0 \quad (1)$$

式中:  $q_u$  为原状土的无侧限抗压强度, kPa;  $q_0$  为具有与原状土相同密度和含水量并彻底破坏其结构的重塑土的无侧限抗压强度, kPa。

上海市轨道交通杨浦线(M8线), 明珠线二期和浦东国际机场都用土工试验法测定过土体的灵敏度, 通过对43个取土试验孔中共135个土样试验结果的统计分析, 得出用室内土工试验法测定的上海市浅层各土层灵敏度的统计值见表1。

表1 室内土工试验法确定的土体灵敏度参数表

层序	土名	子样数	平均值	最大值	最小值	均方差	变异系数
②	褐黄色粘性土	10	3.52	5.25	1.79	1.30	0.39
③	灰色淤泥质粉质粘土	13	3.71	5.67	2.14	1.19	0.33
④	灰色淤泥质粘土	44	5.18	9.83	2.80	1.87	0.37
⑤ <sub>1</sub>	褐灰色粉质粘土夹粘土	59	4.53	7.60	1.96	1.26	0.25
⑤ <sub>3</sub>	灰色粉质粘土	9	4.05	6.87	2.27	1.37	0.36

1.2 十字板剪切试验法

十字板剪切试验是用插入软土中的十字板头, 以一定的速率旋转, 测出土的抵抗力矩, 换算其抗剪强度。用十字板剪切试验确定土体灵敏度的公式<sup>[3]</sup>为:

$$S_t = c_u / c'_u \quad (2)$$

式中:  $c_u$  为饱和粘土不排水抗剪强度, kPa;  $c'_u$  为重

塑土不排水抗剪强度, 应在峰值强度或稳定值强度出现后, 顺剪切扭转方向连续转动 6 圈后测定, kPa。

通过对上海市轨道交通杨浦线(M8 线), 明珠线二期工程上 5 个做过十字板残余强度试验的钻孔中的共 69 个试验数据的统计分析, 得出用十字板剪切试验测定的上海市浅层各土层的灵敏度(见表 2)。

表 2 十字板剪切试验法确定的土体灵敏度参数表

层序	土 名	子样数	平均值	最大值	最小值	均方差	变异系数
②	褐黄色粘性土	1	1.74				
③	灰色淤泥质粉质粘土	22	2.32	4.08	1.32	0.80	0.35
④	灰色淤泥质粘土	30	2.54	3.18	1.49	0.42	0.17
⑤ <sub>1</sub>	褐灰色粉质粘土夹粘土	16	3.69	4.76	2.30	0.67	0.19

1.3 静力触探法

斯米特曼(Schmertmann)1978 年提出的用双桥静力触探试验计算土体灵敏度的公式<sup>[3]</sup>为:

$$S_t = N_s / R_f \quad (3)$$

式中:  $N_s$  为试验常数, 一般取 5 ~ 10,  $R_f$  为摩阻比  $R_f = f_s / q_c \cdot 100\%$ 。

中国地质大学基于双桥静力触探试验提出的计

算灵敏度的公式<sup>[3]</sup>为:  $S_t = 100R_f \quad (4)$

式中:  $R_f$  为摩阻比  $R_f = f_s / q_c$ 。

上面两个公式中, 斯米特曼(Schmertmann)公式试验常数变化范围较大, 不便于研究。本文选用中国地质大学提出的公式(3), 利用上海浦东机场和大众汽车场的两个工地的试验资料, 对上海地区浅层各土层的灵敏度进行了统计分析(见表 3)。

表 3 双桥静探法确定的土体灵敏度参数表

层序	土 名	子样数	平均值	最大值	最小值	均方差	变异系数
② <sub>1</sub>	褐黄色粘性土	16	1.54	2.75	0.57	0.68	0.46
② <sub>3</sub>	灰色粉性土	120	1.55	3.80	0.52	0.66	0.43
③	灰色淤泥质粉质粘土	14	2.63	3.77	1.04	1.00	0.39
④	灰色淤泥质粘土	166	1.95	3.86	0.97	0.52	0.27
⑤ <sub>1</sub>	褐灰色粉质粘土夹粘土	108	1.42	2.07	0.78	0.29	0.20
⑤ <sub>2</sub>	砂质粉土	16	1.75	2.50	0.56	0.68	0.40
⑥	暗绿色粉质粘土	23	3.98	5.95	2.61	0.87	0.22

需要说明的是, 对于粉性土, 一般不提灵敏度, 但作为一种研究探索, 研究起来又比较方便, 顺便将

上海地区浅层粉性土的灵敏度(姑且称灵敏度)一并列入表 3 中, 以便进行对比研究(见表 4)。

表 4 单桥与双桥静探法对比确定的土体灵敏度参数表

层序	土 名	子样数	平均值	最大值	最小值	均方差	变异系数
② <sub>1</sub>	褐黄色粘性土	16	2.60	4.19	1.29	1.02	0.41
② <sub>3</sub>	灰色粉性土	120	1.46	6.68	0.27	1.01	0.69
③	灰色淤泥质粉质粘土	14	1.69	2.58	1.12	0.53	0.32
④	灰色淤泥质粘土	166	2.53	7.40	0.40	0.82	0.32
⑤ <sub>1</sub>	褐灰色粉质粘土夹粘土	108	3.05	5.51	1.83	0.66	0.22
⑤ <sub>2</sub>	砂质粉土	16	0.71	1.20	0.30	0.32	0.46
⑥	暗绿色粉质粘土	23	0.89	1.54	0.55	0.21	0.25

笔者以为, 从静力触探试验的试验机理及对土的破坏方式看, 用单桥静力触探试验  $P_s$  值计算所得的各层土的极限侧摩阻力能够代表原状土的抗剪强

度, 而用双桥静力触探试验测得的侧摩阻力可以代表重塑土的抗剪强度。因此, 土体灵敏度可以用单桥和双桥静力触探侧摩阻力的比值来表示:

$$S_t = f_s / f'_s \quad (5)$$

式中:  $f_s$  是按照上海市工程建设规范《岩土工程勘察规范》(DGJ 08—37—2002)由单桥静力触探  $P_s$  值计算各土层极限侧摩阻力, kPa, 且不受最大值 100 kPa 限制;  $f'_s$  为双桥静探测得的侧摩阻力, kPa。

上海地区有多个工程在同一块场地同时采用单桥和双桥静力触探, 为了与公式(4)进行对比研究, 仍从上海浦东机场和大众汽车场的两个工地各选用一对相邻的单桥和双桥静探试验资料进行研究。通过数理统计, 得出的各土层的灵敏度见表 4。

## 2 各方法所得土体灵敏度的比较分析

为进一步的研究分析, 现对用各种方法确定的上海地区浅层各土层的灵敏度的平均值见表 5。

表 5 各方法确定的土体灵敏度平均值

层序	土名	土工试验法	十字板法	静探(双桥法)	静探(单、双桥对比法)
② <sub>1</sub>	褐黄色粘性土	3.52	1.74	1.54	2.60
② <sub>3</sub>	灰色粉性土			1.55	1.46
③	灰色淤泥质粉质粘土	3.71	2.32	2.63	1.69
④	灰色淤泥质粘土	5.18	2.54	1.95	2.53
⑤ <sub>1</sub>	褐灰色粉质粘土夹粘土	4.53	3.69	1.42	3.05
⑤ <sub>2</sub>	灰色砂质粉土			1.75	0.71
⑤ <sub>3</sub>	灰色粉质粘土	4.05			
⑥	暗绿色粉质粘土			3.98	0.89

通过表 5 可以得出:

1) 室内土工试验法确定的土体灵敏度最大, 其次是十字板剪切试验法和静力触探法。通过对试验机理的分析, 在用室内土工试验法测定土体灵敏度时, 土体结构被彻底破坏, 因而所测的重塑土的残余强度就比较小, 故其灵敏度就偏大; 而用十字板和静探等原位试验测定土体灵敏度时, 因土体结构没有被完全破坏, 因此所测得的重塑土的强度比结构完全破坏时的强度要大, 而其灵敏度值也相对较小。

2) 各方法测得各土层土体灵敏度的规律并不一致。按照上海市一般工程经验, 第④层淤泥质粘土灵敏度最大, 但表中的数据表明, 用十字板法测得的第⑤<sub>1</sub>层灵敏度比第④层大, 而用静探(双桥法)测得的第⑥层灵敏度反而最大。

3) 用笔者提出的静探法(单、双桥对比法)得出的灵敏度同其他几种方法得出的灵敏度相比, 数值比较接近。另外, 其数值在粉性土中更接近于 1, 这与人们平时的认识也比较接近。

在具体的基坑工程、地铁隧道工程和桩基工程施工过程中, 土的结构性并没有完全被破坏, 因此, 用室内土工试验法测定的土体灵敏度的值就会偏大。考虑到这一具体工程情况, 结合表 1~表 5 的试验数据, 上海地区浅层各土层土体灵敏度的推荐值见表 6。在没有进行灵敏度试验的工程中, 可根据土体结构的具体扰动情况按表中推荐的数值取大值或小值; 对用室内土工试验确定的土体灵敏度, 也可以根据实际情况用表 6 中的推荐值对其进行校核。

表 6 上海地区浅部各土层土体灵敏度推荐值

层序	土名	土工试验法
② <sub>1</sub>	褐黄色粘性土	1.5~2.5
② <sub>3</sub>	灰色粉性土	1.0~2.0
③	灰色淤泥质粉质粘土	2.5~3.5
④	灰色淤泥质粘土	3.0~4.0
⑤ <sub>1</sub>	褐灰色粉质粘土	2.5~3.5
⑤ <sub>2</sub>	灰色砂质粉土	1.0~2.0
⑤ <sub>3</sub>	灰色粉质粘土	2.5~3.5
⑥	暗绿色粉质粘土	2.0~3.0

## 3 结论与建议

1) 不同试验方法测得的土体灵敏度有较大的差异, 对室内试验法确定的土体灵敏度, 在实际应用中, 因土体结构没有完全被破坏, 因而要做适当折减。

2) 笔者提出静探法(单、双桥对比法)确定土体灵敏度有一定的实用性, 但因试验数据有限, 结果可能有一定的局限性, 有条件时进行专门试验来验证。

3) 各种方法得出的土体灵敏度有时会有较大差异, 有条件时结合几种方法所得的值来综合选用。

4) 对没有试验数据的工程, 上海地区浅部各土层土体灵敏度可结合具体工程情况, 按表 6 进行取值。对用室内土工试验测定的土体灵敏度, 也可以用表 6 中的推荐值对其进行校核。

5) 希望大家结合工程实践, 共同研究上海地区浅层各土层的土体灵敏度, 以期在下次修订上海市《岩土工程勘察规范》时, 在土体物理力学性质指标统计表中加入灵敏度的取值范围。

## 参 考 文 献

- 1 顾晓鲁等. 地基与基础(第二版). 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. 75~79
- 2 刘松玉, 吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展. 盐城工学院学报(自然科学版), 2003, 16(增刊): 1~8
- 3 林宗元. 岩土工程试验监测手册. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994. 426~440