

# 旁压试验在苏通大桥工程地质勘察中的应用

胡建华<sup>1,2</sup>, 汪 稔<sup>2</sup>, 陈海洋<sup>2</sup>

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

**摘要:** 本文介绍了苏通大桥工程地质勘察中的难点, 阐明了旁压仪进行水上深孔旁压试验的方法, 简要说明了对试验结果进行处理的原理和方法, 并基于所运用的处理原则和方法, 对苏通大桥的旁压试验结果进行了分析和处理, 为大桥的设计提供了各项强度和变形参数, 取得了较好的效果。

**关键词:** 旁压试验; 工程地质; 勘察; 变形参数; 强度参数

中图分类号: TU413

文献标识码: B

**Abstract:** The difficulties in the geological investigation for Su Tong Bridge are introduced. The experimental method for pressuremeter test in deep water is expounded, and the principle and procedure for the analysis on testing results are briefly illuminated. Based on the procedure the pressuremeter testing results are analyzed, which offers the parameters of strength and deformation for the bridge design.

**Key words:** pressuremeter test; geology; exploration; deformation parameter; strength parameter

拟建的苏通大桥位于江苏省常熟市和南通市之间, 江面宽约6km, 下游距长江入海口约108km。分为主桥和南北接线3大块, 主桥长约8206米, 其中主航道桥设计为双塔双索面斜拉桥, 该斜拉桥长2088米, 主跨1088m, 是目前世界第一跨径双塔双索面斜拉桥, 也是目前世界上规模最大、技术难度最高的斜拉桥。但工程地质勘察中, 由于受到取样扰动, 以及难以获取原状砂样等因素影响, 使室内试验的成果难以应用, 为提供准确的基础设计参数, 在设计阶段的详勘中采用旁压试验的原位测试手段, 对地基土的承载力、变形性质进行评价。

## 1 仪器和试验方法

试验仪器为法国 APAGEO SEGELM 公司制造的 MENADR D (GA 型) 预钻式旁压仪。其结构由 3 部分组成, 即读数箱、管路和旁压器。设备规格如下: 旁压器为 Bx 型 (测量腔外径为 60mm、固有腔体积 535cm<sup>3</sup>、测量腔长度为 200mm), 最大工作压力可达 10MPa, 体积测量精度 5cm<sup>3</sup>。

试验用工程钻机在土层中大孔径成孔至试验深度以上 1m, 再采用孔径  $\phi 62$ mm 钻头钻孔试验, 并采取泥浆护壁。

针对本次试验场地和水文地质条件特点, 旁压试验前采取了一系列措施控制试验的精度。(1) 通报每次试验前后水位, 了解水位变化带来的水压力对土体试验压力的变化;(2) 试验时间控制在平潮期间, 对于每天两次的涨落潮间不进行试验, 减少水位变化的压力误差;(3) 每次试验前进行旁压膜约束力的校正, 对于新内膜或导管长度改变还应进行仪器综合变形校正;(4) 严格控制钻孔质量, 保证孔径在允许值的范围。

对试验的土体加荷等级一般根据土的临塑压力或极限压力而定, 在无法预估的情况下, 根据预估的土层类别按照不

同土类的加荷等级表确定, 详见参考文献 [9]。

## 2 试验分析方法与原理

旁压试验可理想化为圆柱孔穴扩张课题, 并简化成轴对称平面应变问题。典型的旁压曲线 (压力  $P$  ~ 体积变化量  $V$  曲线见图 1 所示), 分为三个阶段: 即初始阶段; 似弹性阶段, 压力与体积变化量大致呈直线关系; 塑性阶段, 随着压力的增加, 体积变化量也迅速增加。

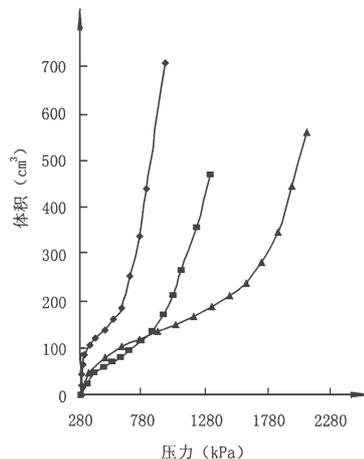


图 1 实测典型旁压  $P$ ~ $V$  曲线

### 2.1 变形参数的确定

根据似弹性阶段直线的斜率, 由轴对称平面应变问题的弹性解可得旁压模量  $E_m$ 、旁压剪切模量  $G_m$ 。

收稿日期: 2003-12-11; 修订日期: 2004-03-17

作者简介: 胡建华 (1975—), 男 (汉族), 湖南省衡阳人, 博士, 讲师。

$$E_m = 2(1 + \mu) \left[ V_c + \frac{V_0 + V_f}{2} \right] \frac{\Delta P}{\Delta V} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$G_m = \left[ V_0 + \frac{V_0 + V_f}{2} \right] \frac{\Delta P}{\Delta V} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中:  $E_m$ ——旁压模量 (MPa);  $G_m$ ——旁压剪切模量 (MPa);  $\mu$ ——泊松比, 试验建议值, 一般正常固结和轻度超固结砂土和粉土取 0.33, 可塑和坚硬状粘性土取 0.38, 软塑粘性土、淤泥和淤泥质土取 0.41;  $V_c$ ——旁压器测量腔的固有体积,  $535 \text{ cm}^3$ ;  $V_0$ ——初始压力  $P_0$  对应的体积;  $V_f$ ——临塑压力  $P_f$  对应的体积 ( $\text{cm}^3$ );  $\Delta P/\Delta V$ ——似弹性阶段直线段的斜率 ( $\text{kPa}/\text{cm}^3$ );

对于砂性土, 由 Menard 根据旁压模量和旁压剪切模量可以推算地基土体的变形模量, 即  $E_0$ :

$$E_0 = E_m / \alpha \quad (3)$$

式中:  $E_0$ ——土的弹性模量;  $\alpha$ ——土的结构系数, 与土的类型、固结状态有关, 一般小于 1, 见参考文献 [2]。

对于粘性土, 根据《铁路工程地质旁压测试技术规则》, 通过对室内土工试验土的压缩模量  $E_s$  对比关系的研究, 得到土的压缩模量  $E_s$  的计算关系如下:

$$E_s = 2.092 + 2.52 G_m \quad (4)$$

土的弹性模量  $E_0$  和压缩模量  $E_s$  的关系:

$$E_0 = [1 - 2\mu^2 / (1 - \mu)] E_s \quad (5)$$

## 2.2 浅基础承载力 $f_0$

利用旁压试验计算浅基础的承载力采用极限压力法, 该方法以净极限压力为依据。地基承载力基本值:

$$f_0 = (P_l - P_0) / K = P_l^* / K \quad (6)$$

式中  $K$  为安全系数, 考虑水上作业的特点, 其安全系数取陆地上的 1.4 倍。

## 2.3 桩侧极限摩阻力 $\tau_l$

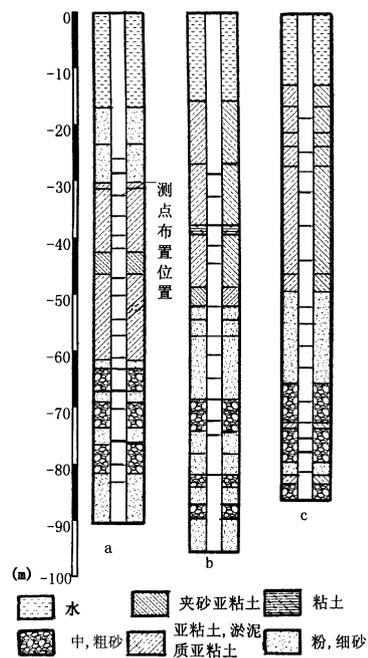
工程中桩基础, 其承载力由桩周侧的摩阻力和桩端承载力两部分提供, 摩擦桩与摩擦一端承桩的侧摩阻力是其承载力的主要组成部分, 考虑到旁压试验孔周围土体受到的作用是以剪切为主, 与桩的作用机理相似, 可以利用旁压试验极限压力  $P_l$  和旁压试验初始压力  $P_0$  与桩的极限摩阻力建立相关关系。目前国内外都在进行这方面的研究, 并已取得了一些成果, 可用下式估算桩的桩侧摩阻力  $\tau_l$ :

$$\tau_l = \frac{P_l^*}{20} \quad (7)$$

## 3 试验结果分析与应用

旁压试验在主航道桥 69 号桥墩 XK112 钻孔、主航道桥 71 号桥墩 XK127 钻孔、主航道桥 72 号桥墩 XK131 钻孔 3 个钻孔内进行。旁压试验的测点布置及钻孔柱状图如图 2。旁压试验地层主要包括③淤泥质亚粘土和亚粘土, ④淤泥质亚粘土和亚粘土, ⑤细砂和粉砂以及⑥中砂和粗砂, 其中部分亚粘土夹砂。

(1) 旁压试验的典型曲线, 均包括典型旁压曲线的 3 个阶段, 即初始阶段、弹性阶段和塑性阶段。但由于不同土层强度参数与变形参数的差异, 试验的直线段斜率和长度都



a) 69 号墩 XK112 孔; b) 71 号墩 XK127 孔; c) 72 号墩 XK131 孔

图 2 测点布置与钻孔柱状图

不一致, 见图 1。

(2) 由实测资料计算各点变形参数 (旁压模量和压缩模量)、强度参数 (浅基础地基承载力和桩侧摩阻力) 的结果分别见图 3 和图 4。随测试深度及其组成成分差异, 旁压试验各点的强度参数和变形参数值均与测试深度和土层性质有关, 经对四种试验点数超过六个的土层进行统计分析发现, 各土层又具有一致性, 各土层的统计结果变异系数在土工试验统计中按照变异系数的判定类别, 本次旁压试验结果的变异性属于很小和小的范围 (见表 1)。

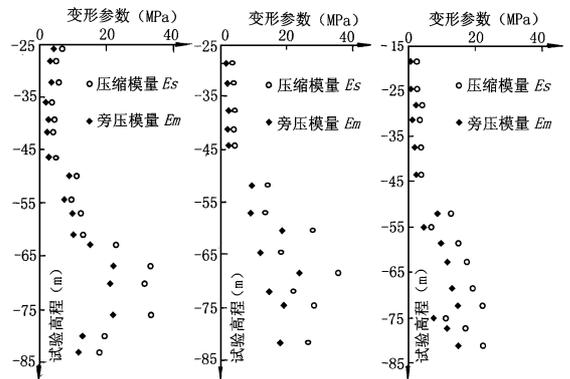


图 3 旁压试验土层变形参数沿高程分布

由统计试验结果可发现, ③淤泥质亚粘土和亚粘土的压缩模量范围在  $2.94 \sim 5.05 \text{ MPa}$ , 地基承载力范围在  $73 \sim 121 \text{ kPa}$ , 桩侧摩阻力范围为  $22 \sim 46 \text{ kPa}$ ; ④淤泥质亚粘土和亚粘土压缩模量为  $3.50 \sim 5.77 \text{ MPa}$ , 地基承载力范围在  $79 \sim 182 \text{ kPa}$ , 桩侧摩阻力为  $39 \sim 73 \text{ kPa}$ , 并且在这一层中, 有部分夹砂亚粘土, 其压缩模量和强度参数偏大, 可能是因为这两层土质均匀, 这两层土的变异性均很小; ⑤细砂和粉砂压缩模量为  $10.41 \sim 41.07 \text{ MPa}$ , 地基承载力范围在  $122 \sim 457 \text{ kPa}$

土层名称	样本数	项目名称	旁压模量 $E_m$ (MPa)	压缩模量 $E_s$ (MPa)	地基承载力 [ $f_0$ ] (kPa)	桩侧摩阻力 $\tau_1$ (kPa)	备注
③ 淤泥质亚粘土和亚粘土	7	平均值	1.97	3.85	96/90~100	35/20~30	地基承载力和桩侧摩阻力表示方式为: 实测结果统计值/详勘推荐值
		变异系数	0.17	0.08	0.07	0.11	
④ 淤泥质亚粘土和亚粘土	15	平均值	2.51	4.35	114/90~110	47/30~50	
		变异系数	0.08	0.09	0.09	0.06	
⑤ 细砂和粉砂	9	平均值	11.04	24.41	295/200~300	72/35~60	
		变异系数	0.13	0.13	0.13	0.10	
⑥ 中砂和粗砂	10	平均值	16.33	36.11	499/400~500	93/60~70	
		变异系数	0.11	0.11	0.05	0.04	

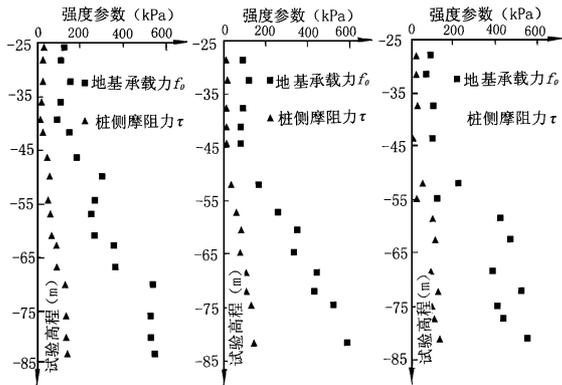


图 4 旁压试验土层强度参数沿高程分布图

桩侧摩阻力为 39~101 kPa; ⑥ 中砂和粗砂压缩模量为 16.56~52.28 MPa, 地基承载力范围在 361~531 kPa, 桩侧摩阻力为 80~108 kPa, 这两层由于砂性土含量的变化较大, 各参数的变化差异大, 其变异性大;

(3) 试验结果与《公路工程地质勘察规范》中推荐值较一致, 并与详勘其他试验综合分析, 为苏通大桥施工图设计提供了参数, 详勘最终提供的设计推荐值范围与旁压试验计算结果见表 1。

#### (4) 变异性的分析

由于水上作业, 受涨落潮水位变化, 以及钻孔泥浆护壁压力的影响, 同一土层的变形参数与强度参数具有一定的变异性, 但变异性在工程中都属于较小的范畴。

## 4 结论

预钻式旁压仪具有设备结构简单、携带轻便、操作方便、结果可靠等优点, 易于克服岩土试验中取样、试件加工、参数选取等困难, 能够准确提供深埋土层的原位力学性

质。能较为客观地反映所测对象的强度、变形特性, 为地基评价和基础选型提供科学依据。本文应用旁压仪进行了拟建苏通大桥主航道的桥墩土层原位测试, 为工程设计提供了基础数据, 取得了较好的效果, 也可类似工程提供参考。

致谢: 试验过程得到了交通部第二航务工程勘察设计院刘治安高工的大力支持, 在此表示感谢。

## 参考文献

- [1] 祝龙根, 刘利民等编著. 地基基础测试新技术. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 唐贤强, 谢瑛等编著. 地基工程原位测试技术. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [3] 吴文, 徐松林. 旁压仪在岩土工程深部原位测试技术中的应用. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 100~103.
- [4] 祝德生. GA 型旁压仪的应用及成果分析. 探矿工程, 1998(2): 4~6.
- [5] 岩土工程手册编写委员会. 岩土工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [6] 中华人民共和国行业标准. 公路工程地质勘察规范 (JTJ069-98). 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [7] 《Standard test method for pressuremeter testing in soil》. American Society for Testing and Materials, 1976.
- [8] 中华人民共和国国家标准. 岩土工程勘察规范. (GB50021-2001). 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] 中华人民共和国行业标准. PY 型预钻式旁压试验规程 (JGJ69-90). 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [10] 孟高头著. 土体原位测试机理、方法及其工程应用. 北京: 地质出版社, 1997.
- [11] 彭柏兴. 旁压试验确定单桩承载力的方法与应用. 岩土钻掘矿业工程, 1998(3): 24~27.
- [12] 胡建华, 汪稔, 周平等. 旁压仪在地基工程原位测试中的应用. 岩土力学, 2003(24)(增刊): 418~422.

(上接第 39 页)

## 5 结语

实验表明, 采用“二合一”深层搅拌桩作为桩基防护和基坑围护双重作用, 搅拌桩由于具有一定的刚度和整体性, 不仅能有效隔离超孔隙水压力对周围环境的影响, 并且在桩基施工完毕后能保证搅拌桩桩体完整, 使其既能起到良好的防护效果, 又可节省整个工程造价, 对同类工程的设计和施

工有着很好的指导和借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 上海市工程建设规范《基坑工程设计规程》(DGJ08-61-97).
- [2] Henkel D. J. The strength of saturated remoulded clays. Proceedings Research Conference on Shear Strength of Cohesion Soils. ASCE, 1960, 533~546.
- [3] Skempton A. W. The pore-pressure A and B. Geotechnique, 1954, 4(4): 143~148.