

旁压试验在苏通大桥地质勘察工程中的应用

汪 稔, 胡建华

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

摘 要: 详细介绍了旁压试验的使用方法, 以及受潮汐影响的大桥勘察旁压原位测试中的特殊处理措施, 分析了旁压试验中各强度参数指标的处理方法和原则, 并运用这些方法和原则处理了苏通大桥旁压试验的强度参数指标, 为大桥的设计提供了设计强度参数, 也可同类工程提供参考意义。

关 键 词: 旁压试验; 强度参数; 原位测试

中图分类号: TU 413 文献标识码: A

Application of pressuremeter test to estimating intensity parameters in geological exploration for Sutong Bridge

WANG Ren, HU Jian-hua

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The use method of pressure meter test and some special measures for in-situ pressuremeter test for exploration of a bridge which is affected by tide, are described in detail. The principles and treatment methods for intensity parameter. Indexes in the pressure-meter tests are also analyzed; and these methods and principles have been applied to treat intensity parameter indexes of the Sutong Bridge so as to offer design intensity parameters for the bridge design. The results will be for reference of similar projects.

Key words: pressuremeter test; intensity parameter; in-situ measurement

1 前 言

旁压试验是工程地质勘察中的一种原位测试方法, 简称 PMT, 也称横压试验。自 1957 年, 法国道桥工程师梅那 (Menard) 发明了三腔式旁压仪以来, 经过几十年的完善、发展应用和推广, 旁压试验已广泛应用于工程场地地质评价、基础设计中地基承载力的确定和桩基设计计算等方面, 已成为地基勘察和基础设计的实用、可靠的方法之一。

本文介绍了在长江下游苏通大桥施工图设计阶段工程地质勘察中的旁压试验及试验结果的处理方法。试验水深平均 18 m 左右, 并受潮汐的影响, 试验进入土层深度超过 60 m, 在试验后, 整理出各测点的强度参数, 如旁压试验的初始压力、临塑压力和极限压力, 以及基础设计强度参数, 如粘土不排水抗剪强度、浅基础承载力和桩侧摩阻力。

2 旁压试验原理、仪器构成和使用

2.1 旁压试验原理

旁压试验原理是通过旁压器, 在竖直的孔内使旁压膜膨胀, 并由外膜将压力传给周围土体, 使土体产生变形直至破坏, 由此得到压力与体积增量之间的关系, 从而对地基土的承载力 (强度) 和变形性质等进行评价^[1]。

2.2 旁压试验构成及使用方法

试验仪器为法国 APAGEO SEGELM 公司制造的 MENADRD (GA 型) 预钻式旁压仪。其结构由 3 个部分组成, 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 60 mm、固有腔体积 V_c 为 535 cm³、测量腔长度为 200 mm), 最大工作压力可达 10 MPa, 最大测试深度可达 100 m 以上。

试验时,使用工程钻机在岩土层中钻出孔径为 62 mm 的钻孔,并成孔至试验深度以下 1 m 左右,视需要可采取泥浆护壁。其工作程序如下:首先打开水源阀门,向旁压器的测量腔充入一定量的水后关闭。然后,打开气源阀门,通过控制装置将高压气源减压,并分成两部分,一部分供给测量腔,一部分供给辅助腔,使旁压器受压(测量腔为气压水)而膨胀。再对周围的土体施加一定的横向压力,从而使土体产生一定的变形,并由压力表和体积测管测出相应的压力值和体积变形量,经过校正、换算得到试验土体的力和变形的关系。根据这种关系可对地基土体的承载力和变形性质进行评价。

试验采用不排水快剪模式,加荷稳定时间为 3 min,一般压力加载至平稳的时间为 15 s^[2-4]。

对于试验土体的加荷等级,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,可根据预估土层类别按照不同土类加荷等级表确定^[4,5],见表 1。

表 1 旁压试验的加荷等级表
Table 1 The adding load grades of pressuremeter test

土 的 特 性	加荷等级 / kPa	
	临塑压力前	临塑压力后
淤泥、淤泥质土、流塑粘性土和亚砂土、饱和松散的粉细砂	15	30
软塑粘性土和亚砂土、稍密很湿粉细砂、稍密中粗砂	15~25	30~50
可塑-硬塑粘性土和亚砂土、中密-密实很湿粉细砂、稍密-中密中粗砂	25~50	50~100
坚硬粘性土和亚砂土、密实中粗砂	50~100	100~200

3 影响旁压试验结果的因素

旁压试验作为一种原位试验,由于受试验场地和技术条件的限制,影响其测试结果的因素较多,如:钻孔孔径的大小,钻孔内的泥浆压力,钻孔对岩、土层原始状态的扰动等^[6]。本次试验分析了旁压试验的影响因素,并采取了相应的措施。(1) 钻孔孔径的影响。试验要求钻孔孔径比旁压器外径大 2~8 mm,但由于江风以及高钻架钻杆偏心的影响,孔径难以控制,为减少钻孔孔径带来的误差,本次试验的钻具采用允许的最小外径 62 mm,保证钻孔孔径在试验的允许范围内;(2) 钻孔内泥浆压力的影响。此因素是长期困扰工程界的难题,目前,还没有切实可行的办法来消除其影响。因为,泥浆压力不仅与其深度有关,而且还与泥浆浓度等复杂的因素有关,本次试验由于试验深度、泥浆压力和浓度均较大,泥浆护壁压力为本次试验的主要误差来

源;(3) 钻孔过程对较松软土、岩层原始状态的扰动影响。即预钻式钻孔,不仅使原始状态有一个应力释放的过程,而且,对原始土、岩层有一个机械磨擦的过程,对浅层的试验数据影响较大,但目前缺乏定量的研究;(4) 试验过程受潮汐的影响,旁压器中测量腔静水压力发生变化。本次试验在试验的时间上尽量安排在平潮时进行,并且,在试验前已查明水深,从而能准确计算试验时的试验深度,减少测量腔中静水压力的计算误差,在试验操作中,将加载级数严格控制在 12~15 级间,使试验时间控制在尽量短的间隔内,减少潮汐对试验造成的误差。由于以上因素的影响,使得各计算参数有一定的离散性。

4 旁压仪的率定

为得到土的真实压力-变形关系,进而计算出地基土的参数,必须对旁压试验所观测的压力和变形(体积变化)进行校正。为此,必须在试验前对旁压探头自身体积膨胀的压力损耗和一定压力下的仪器体积损耗进行校定。(1) 旁压仪探头压力损耗校定,即探头在无外压力约束作用下,其自身弹性膜体积扩张与压力的关系,并绘制旁压仪探头压力损耗校定的 $P-V$ 曲线,试验中土体受到的实际压力应减去同一体变时旁压探头压力损耗值。(2) 仪器体积损耗校定,即综合变形率定,消除在压力作用下,连接单元和旁压器管路膨胀,以及橡胶膜和水的压缩造成的系统体积的损失。因此,作用于土体的真实的压力值 P 和体积变形值 V ,应由试验结果进行校正,其校正公式如下^[3]:

$$P = P_m + U_w - P_i \quad (1)$$

$$V = V_m - a_p(P_m + U_w) \quad (2)$$

式中 P 为校正后的压力; P_m 为压力表的读数; U_w 为静水压力; P_i 为弹性膜约束力,由各级总压力($P_m + U_w$)对应的体积 V_m 查弹性膜约束力率定曲线; V 为校正后的体积; V_m 为($P_m + U_w$)所对应的体积; a_p 为仪器综合变形校正系数,其值为仪器综合变形率定曲线中直线段的斜率。

5 强度参数确定方法

旁压试验得到的强度参数,可以分为旁压强度参数(旁压初始压力、临塑压力、极限压力)和设计强度参数(粘土不排水抗剪强度、浅基础承载力、桩侧摩阻力)。

5.1 旁压强度参数确定

旁压试验的初始压力 P_0 , 定义为地层水平压

力，由于受孔径和孔壁扰动程度等的影响，采用作图修正法确定，即把 $P-V$ 曲线的直线段延长至与 V 轴相交，其交点定义为 V_{0m} 。然后，从 V_{0m} 引水平线至与 $P-V$ 相交，交点对应的压力为 P_0 (参见图 1)。

定义 3 min 与 30 s 测管体积下降的差值为蠕变值，蠕变值与压力曲线对应的两个拐点，分别对应旁压 $P-V$ 曲线中直线段的两个端点，第一个拐点对应的旁压 $P-V$ 曲线中的体积为 V_0 ，而第二个拐点对应的压力值为临塑压力 P_{f0} 。

旁压试验极限压力，在旁压试验过程中，随压力增加孔穴体积扩张。当其量为 $2V_0+V_c$ 时，所对应的压力定义为极限压力 P_1 ，由于旁压仪本身构造和成孔孔径大小的关系，试验往往满足不了体积变形的要求，难以直接求出极限压力。因此，利用作图法可以确定极限压力 P_1 ，由 $P-1/V$ 曲线的延长线与 $1/(2V_0+V_c)$ 的交点对应的压力为 P_1 (参见图 1)。

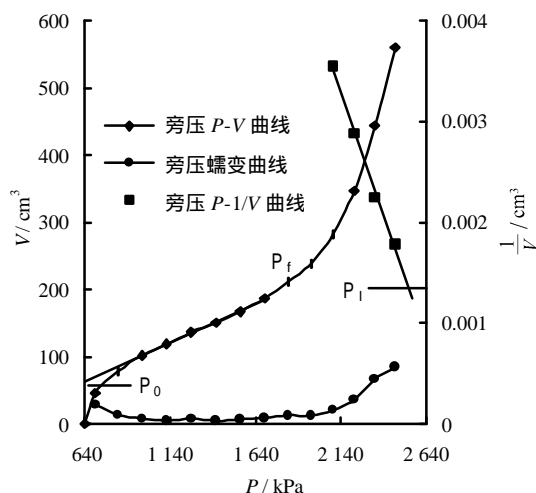


图 1 实测旁压试验确定各强度参数图

Fig. 1 Calculated intensity parameters according to pressuremeter test

5.2 设计强度参数确定

旁压试验作为一种原位横压试验，在基础勘察中的应用主要目的之一就是确定地基强度参数。

(1) 计算粘性土的不排水抗剪强度 C_u

旁压试验参数与粘性土不排水抗剪强度之间的理论关系为^[7]

$$\left. \begin{aligned} C_u &= P_f - P_0 \\ \text{或 } C_u &= \frac{P_1^*}{1 + \ln\left(\frac{G}{G_m}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 G 为剪切模量 (MPa); G_m 为旁压剪切模量 (MPa); P_1^* 为净极限压力, $P_1^* = P_1 - P_0$ 。

在工程实践中常采用 Lukas 建议, 即

$$C_u = \frac{P_1^*}{5.1} \quad (4)$$

(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。地基承载力基本值为

$$f_0 = \frac{(P_1 - P_0)}{K} = \frac{P_1^*}{K} \quad (5)$$

式中 K 为安全系数, 其取值见参考文献[7], 考虑水上作业的特点, 以及桥梁工程安全性的要求, 其安全系数取陆地上的 1.4 倍。

(3) 桩侧极限摩阻力 t_1

工程中桩基础是最常用的深基础, 其承载力由桩侧摩阻力和桩端承载力两部分提供, 桩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_1 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^[7, 8], 并已取得了某些成绩, 可用下式估算桩侧摩阻力^[9]:

$$t_1 = \frac{P_1}{20} \quad (6)$$

式中 t_1 为桩侧摩阻力。

6 工程应用

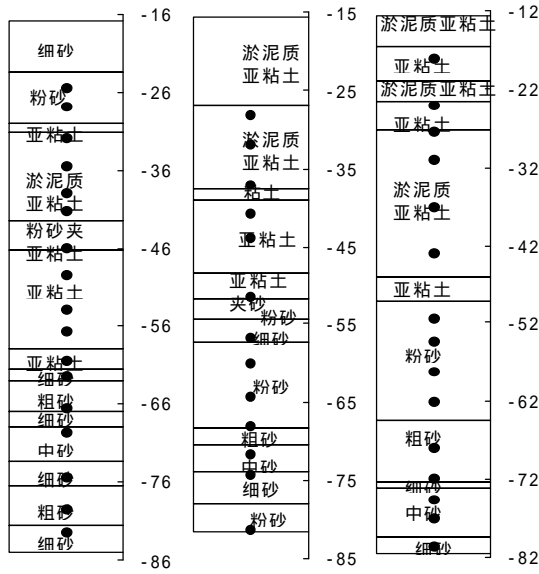
6.1 工程概况

拟建的苏通大桥作为江苏省东部靠近上海的过江通道, 对于完善江苏省高速公路网具有重要意义。苏通大桥北岸位于江苏省南通市南通农场附近, 南岸位于常熟电厂下游 2 km 处, 江面宽约 6 km, 下游距长江入海口约 108 km, 试验期间江面最大风力达 9~10 级, 潮汐最大高差达 3 m。拟建的苏通大桥工程分为主桥和南北接线 3 大块, 主桥长约 8 206 m, 其中主航道桥为双塔双索面斜拉桥, 该斜拉桥桥长 2 088 m, 主跨 1 088 m, 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。为对主航道基础的强度参数 (承载力和桩基桩侧摩阻力) 进行评价, 分别在主航道桥的 3 个桥墩进行了旁压试验。

6.2 试验点布置及试验结果

在主航道桥 69 号桥墩 XK112 钻孔、71 号桥墩 XK127 钻孔、72 号桥墩 XK131 钻孔 3 个钻孔中进行旁压试验。旁压试验的测点布置及钻孔柱状图如图 2。旁压试验土层主要包括 Q_3 和 Q_4 淤泥质亚粘土、亚粘土 (其中 Q_4 部分亚粘土夹砂); Q_4 细砂和

粉砂以及 Q₄ 中砂和粗砂。



(a) 69号桥墩 (b) 71号桥墩 (c) 72号桥墩

图2 测点布置与钻孔柱状图 (单位: m)

Fig. 2 Measure point dispose and borehole histogram(unit: m)

(1) 由图3可知,三种典型土层的旁压试验 $P-V$ 曲线,均反映出 $P-V$ 曲线的3个典型阶段,即初始阶段、似弹性阶段和塑性阶段。但旁压 $P-V$ 曲线图中直线段斜率和长度却不一致,这说明各土层的强度与变形性质存在差异。试验各强度参数值见图4~6。

(2) 由试验结果强度参数随试验深度的变化图可以发现,旁压试验的强度参数数值随深度和土层的变化而变化。在本次试验的土层中,强度值的范围由小到大依次为 Q₃ 淤泥质亚粘土、亚粘土; Q₄ 淤泥质亚粘土、亚粘土; Q₄ 细砂、粉砂; Q₄ 中砂、粗砂。在 Q₄ 亚粘土中,由于部分夹砂,其强度

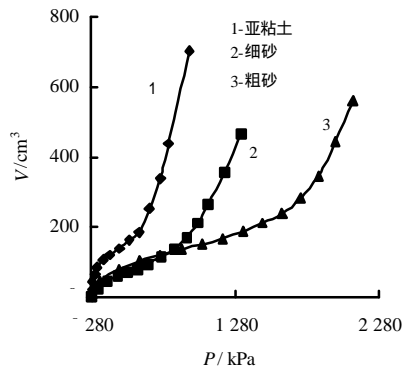


图3 三种典型土层旁压试验的 $P-V$ 曲线图

Fig. 3 The $P-V$ graph of pressuremeter test

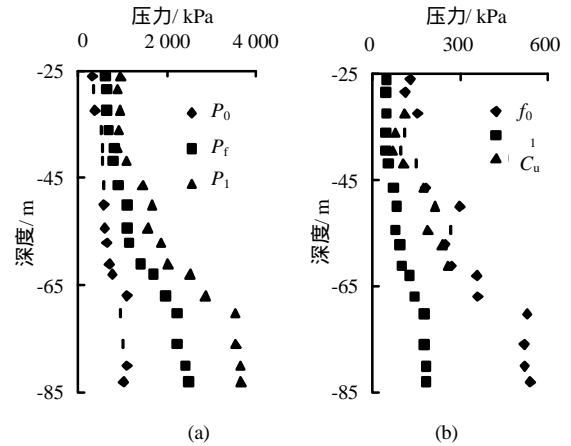


图4 69号桥墩强度参数随试验深度变化图

Fig. 4 The relationship between soil intensity parameters and depths in the #69 pier

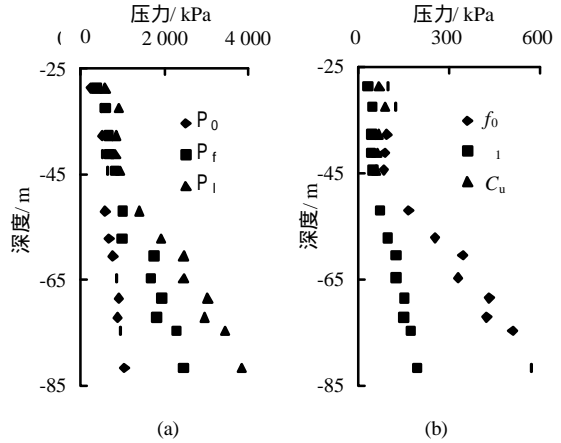


图5 71号桥墩强度参数随试验深度标高变化图

Fig. 5 The relationship between soil intensity parameters and depths in the #71 pier

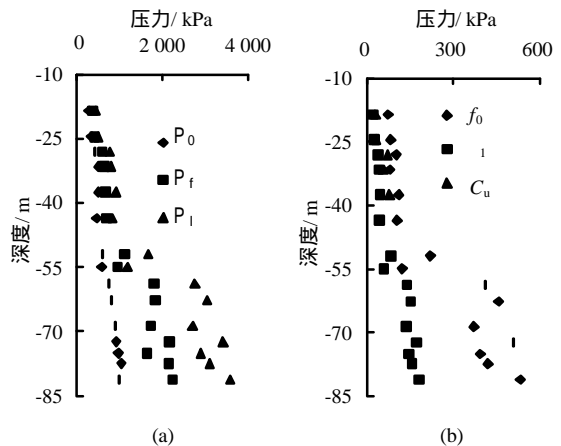


图6 72号桥墩强度参数随试验深度标高变化图

Fig. 6 The relationship between soil intensity parameters and depths in the #72 pier

指标高于该层同类土中的值，在 69 号桥墩和 71 号桥墩钻孔中均有反映，同时，强度参数值随深度的增加而增大，这与我们的认识也是一致的。

(3) 对试验的 4 个主要土层进行统计分析发现(见表 2)， Q_4 淤泥质亚粘土、亚粘土， Q_4 中砂、粗砂， Q_3 淤泥质亚粘土、亚粘土， Q_4 细砂、粉砂的变异系数都在较小的范畴内，可以认为这是由于 Q_4 淤泥质亚粘土、亚粘土和 Q_4 中砂、粗砂的土层均匀，并且， Q_4 土层中夹砂试验点的试验结果未进行统计，而 Q_3 主要位于试验的浅层，受钻孔扰动影响

较大， Q_4 细砂、粉砂、土层为粉、细砂性土，各试验点含砂量和粗颗粒的含量具有差异而造成变异系数大于 0.1 的。

(4) 旁压试验强度参数值与《公路工程地质勘察规范》^[2] (JTJ064-98) 推荐各类土层强度参数值进行比较，旁压试验计算的强度参数值在推荐值的上限值附近，砂性土层的计算强度参数值比推荐值的上限值略偏大，这也说明在砂性土等松散土层中，规范推荐值偏于保守，原位试验的结果更接近实际。

表 2 旁压试验设计用强度参数统计分析结果表

Table 2 Statistically analytical results of designing intensity parameters with pressuremeter test

统计指标	Q_3 土层		Q_4 淤泥质亚粘土、亚粘土		Q_4 细砂、粉砂		Q_4 中砂、粗砂	
	f_0 / kPa	t_f / kPa	f_0 / kPa	t_f / kPa	f_0 / kPa	t_f / kPa	f_0 / kPa	t_f / kPa
平均值	96	35	114	47	295	72	449	93
最大值	121	22	182	73	457	101	531	108
最小值	73	46	79	39	122	39	361	80
均方差	6.47	3.92	10.53	2.96	39.72	7.55	21.97	3.30
变异系数	0.07	0.11	0.09	0.06	0.13	0.10	0.05	0.04

注： Q_3 土层， Q_4 淤泥质亚粘土、亚粘土， Q_4 细砂、粉砂， Q_4 中砂、粗砂，土层所取的样本数分别为 7，15，9，10。

7 结论

(1) 现代的桥梁工程所涉及的地层越来越复杂，深度也越来越大。对于工程设计者而言，为了工程的安全可靠，需要了解一些特殊的深埋土层的原位力学性质，应用旁压仪则不失为一种较好的办法。

(2) 预钻式旁压仪具有设备结构简单、携带轻便、操作容易，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。对难以取到原状试样的砂性土层，更具有实用意义。

(3) 应用旁压仪对拟建苏通大桥主航道的桥墩土层进行原位测试，获得了大量的原始数据，经计算和参考各规范推荐的强度参数值，为工程设计提供了设计的强度参数，取得了较好的效果，也可供类似工程参考。

(4) 由于所测试深度较大，一般采用预钻式泥浆护壁，因为这种方法对土层的原始状态的扰动较大，以及受潮汐的影响，试验过程中测量腔静水压力有一定变化，这些都造成了一些试验数据的离散，需要在以后的实践中进行改进。

参 考 文 献

- [1] 唐贤强, 谢瑛, 谢树彬. 地基工程原位测试技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [2] JTJ064-98, 公路工程地质勘察规范[S].
- [3] Standard test method for pressuremeter testing in soil[S]. American Society for Testing and Materials. 1976.
- [4] JGJ69-90, PY 型预钻式旁压试验规程[S].
- [5] 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [6] 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[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 100 - 103.
- [7] 彭柏兴. 旁压试验确定单桩承载力的方法与应用[J]. 岩土钻掘矿业工程, 1998, (3): 24 - 27.
- [8] 孟高头. 土体原位测试机理、方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [9] 祝龙根, 刘利民, 耿乃兴. 地基基础测试新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.