5月

2011 年

文章编号:0253-9993(2011)05-0784-06

基于地震波孔压静力触探(SCPTU)刚性桩承载力 预测及荷载响应分析

苗永红¹² 蔡国军¹ 刘松玉¹

(1. 东南大学 岩土工程研究所 江苏 南京 210096; 2. 江苏大学 江苏 镇江 212013)

摘 要:基于地震波孔压静力触探(SCPTU)资料对桩侧摩阻力和桩端承载力进行预测,同时提供了 土层剖面特征。应用弹性理论通过实测的剪切波速估算初始桩土刚度。提出了修正双曲线法应用 于弹性模量随着轴向荷载增大的非线性响应,实现了对刚性桩的荷载 – 沉降 – 承载力分析。结合 不同土质条件工程实例分析,并通过统计和现场载荷试验验证了此方法的有效性和准确性。结果 表明:考虑孔压修正的承载力估算法完全满足工程要求,新方法略微低估了承载力,可视为安全储 备;新方法累计概率图平缓、离散性小,接近对数正态分布,具有更高可靠性;利用修正双曲线模量 衰减法进行荷载响应分析具有较强的实用性。

关键词:地震波孔压静力触探(SCPTU);刚性桩;承载力;荷载响应;竖向位移 中图分类号:TU473.11 文献标志码:A

The capacity prediction and load response analysis of the rigid pile based on seismic piezocone penetration test (SCPTU)

MIAO Yong-hong^{1,2} ,CAI Guo-jun¹ ,LIU Song-yu¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering Southeast University Nanjing 210096 , China; 2. Jiangsu University Zhenjiang 212013 , China)

Abstract: Based on the seismic piezocone penetration test (SCPTU) pile side friction and base capacity were predicted and soil profile characteristics were also provided. According to the elastic theory initial stiffness was estimated by the measured shear wave velocity. The modified hyperbola method was applied in axial load increases with the nonlinear responses the rigid pile load-settlement-capacity was analyzed. In different soil conditions the rigid piles case histories were conducted also the effectiveness and accuracy of the method were verified by statistics and load tests. It is concluded that the new method based on revised pore pressure can completely satisfy the requirements and it can be regarded as safety. The new method has small discrete whose cumulative probability graph is flat close to the lognormal distribution and higher reliability. Modified hyperbolic decay modulus method is useful for load response analysis. **Key words**: seismic piezo cone piezocone test (SCPTU) ; rigid pile; capacity; load response; vertical displacement

通常将用来支持构筑物、塔基、桥梁等较大的轴 向荷载的刚性桩评价分为两个过程:轴向承载力和轴 向变形。在计算承载力时,根据加载过程中是否排 水、土颗粒类型、以及荷载作用方向,基于弹性模型、 弹性连续理论、以及经验关系的方法都可用来进行变 形分析^[1]。应用有限元、离散元、有限差分以及边界 元法可用来描述桩土界面的应变变化。然而,简单分 析方法在快速、经济、可靠地估算轴向荷载及响应方面具有较大优势。基于 SCPTU 评价轴向承载力和应用初始刚度 E_0 进行相应变形分析是适宜的^[2],该方法提供了相应土层应力 – 应变 – 强度。从而为桩荷载 – 沉降 – 承载力提供了基础。

桩承载力受许多因素影响变得十分复杂。由于 与桩类似性,基于 CPT 确定桩基的承载力在国内外

收稿日期:2010-08-13 责任编辑:柴海涛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50879011)

作者简介:苗永红(1973—), 男山西阳泉人 副教授,博士研究生。E-mail: yhmiao1998@163.com

已积累丰富的经验^[3-6]。地震波孔压静力触探 (SCPTU)提供4个连续参数:锥尖阻力 q_e 、侧壁摩阻 力 f_s 、孔隙水压力u和剪切波速 v_s 。本文基于 SCPTU 测试结果应用弹性理论对刚性桩轴向荷载 – 位移 – 承载力反应进行了分析.估算了刚性桩侧阻力 f_p 和端 阻力 q_b 。结合工程实例.通过统计分析和现场载荷 试验验证了新方法的有效性和准确性。

1 轴向荷载传递机理及竖向变形分析

1.1 轴向荷载传递机理

基于弹性介质理论,竖向荷载作用下,假设为 Gibson型土,考虑桩身压缩。对桩径为d、桩长为L 时,位移s的近似解析解(图1)为

$$s = \frac{Q_1 I_{\rho}}{dE_s} \tag{1}$$

式中,Q,为竖向荷载;I,为位移影响系数,取决于桩长细比、材料、土体均匀性以及桩土刚度。

文献[7-9]给出 I。表达式为

$$I_{\rho} = 4(1 + \nu) \frac{1 + \frac{1}{\pi\lambda} \frac{8}{(1 - \nu)} \frac{\eta}{\xi} \frac{\tanh(\mu L)}{\mu L} \frac{L}{d}}{\frac{4}{(1 - \nu)} \frac{\eta}{\xi} + \frac{4\pi\rho}{\zeta} \frac{\tanh(\mu L) L}{\mu Ld}}$$

式中 ν 为土泊松比; $\lambda = 2(1 + \nu) E_{\nu} / E_{sl}$; η 为桩底直 径与桩径之比; $\zeta = In\{ [0.25 + (2.5\rho^*(1 - \mu) - 0.25) \xi] (2L/d) \}$; $\mu L = 2 [2/(\zeta\lambda)]^{0.5} (L/d)$; ρ 为 E_{sm} / E_b ; $\xi = E_{sL} / E_b$; E_{s0} 为z = 0 处桩侧土模量; E_{sm} 为位 于桩中部深度处桩侧土模量; E_{sL} 为z = L处桩侧土模 量; E_v 为桩模量; $\rho^* = E_{sm} / E_{sL}$ 。



图1 土体中刚性桩的弹性解



基于弹性连续介质理论,文献[9]给出传递到桩 端部分值 表示为

$$\frac{Q_{\rm b}}{Q_{\rm t}} = \frac{\frac{4}{1-\mu}\frac{\eta}{\xi}\frac{1}{\cosh(\mu L)}}{\frac{4}{1-\mu}\frac{h}{\xi} + \frac{4\pi\rho}{\zeta}\frac{\tanh(\mu L)}{\mu L}\frac{L}{d}}$$
(3)

式中 *Q*_b和 *Q*_c分别为传递到桩端和作用在桩顶荷载; 对非均质土、端承桩 *,*考虑桩压缩效应 ,可进行更复杂 情况位移影响因数 I。和荷载传递分析。

1.2 竖向变形分析

研究表明^[10],小应变刚度可用于初始静力单调 加载以及岩土工程材料动力加载。初始动剪切模量 定义为最大剪切模量(*G*₀),该值可应用于胶粒、黏 土、粉土、砂、砾石、大块石以及裂隙岩石所有类型。 等价弹性模量表示为

$$E_0 = 2G_0(1 + \nu) \tag{4}$$

式中,泊松比 ν 根据经验取 0.2~0.3。

土体应力 – 应变 – 强度 – 时间响应具有复杂性 和高度非线性 随着应变水平变化,采用修正方法可 直接得到 E_0 。对于岩土工程材料,通过试验可得出 剪切模量 – 剪切应变曲线,通常变形分析范围处于中 间应变水平($10^{-5} \sim 10^{-3}$),而小应变剪切模量提供 了较好参考值。因此,本文基于实测剪切波速讨论通 过将初始模量适当折减至相应应力水平的新方法。

剪切模量随着应变水平递减过程通常用归一化 形式表示。动力加载条件下,文献[11]对归一化剪 切模量和剪应变数据间关系进行了分析,通常变形分 析范围内单调静力加载较循环加载呈随应变更快衰 减。

室內单剪试验由于基座误差、过滤石的基座问题 以及试样末端边界效应导致缺陷。现在新测试手段 可准确量测在小应变状态下土体刚度^[12]。图2为归 一化模量随强度的衰减曲线,图中 q 为设定强度 Aut 为极限强度。



图 2 模量随强度衰减曲线

修正双曲线法归一化形式表示为

$$E/E_0 = 1 - f(q/q_{ult})^g$$
 (5)

式中 *f* 和 g 为拟和参数。

将f = 1时不同g值的双曲线绘在图 2 可发现, 当f = 1g = 0.3时对不同土类提供了最佳拟合。本 文将采用此参数双曲线型量化模量衰减过程。小应 变刚度对应于剪切模量最大值,并且剪切模量($G_0 = \rho_v v_s^2$)随着应变增大而减小。根据土的密度和剪切波 速的经验公式^[13]确定即

$$\rho_{\rm t} = 0.277 + 0.648 \lg v_{\rm s} \tag{6}$$

式中 ρ_{t} 为土密度 g/cm^{3} ; v_{s} 为剪切波速 m/s。

根据弹性理论 $E_0 = 2G_0(1 + \nu)$.修正双曲线法可 反映不同荷载水平下模量变化。联合式(3)和(1)近 似得到非线性荷载 – 位移 – 承载力表达式(7),本文 拟采用该式进行刚性桩轴向荷载响应分析,即

$$s = \frac{Q_{1}I_{p}}{dE_{0}\left[1 - (Q_{1}/Q_{tu})^{g}\right]}$$
(7)

2 基于 SCPTU 预测单桩承载力法

孔压静力触探可以认为是微型桩,通过对实测的 应力修正得到桩侧摩阻力和桩端阻力。

2.1 基于 SCPTU 预测承载力法

目前,基于 CPTU 资料提出了许多用来预测桩的 轴向承载力的方法。Almeida 等^[13]基于 8 个黏土场 地的 CPTU 与桩基资料提出了利用"净"修正锥尖阻 力 q_{net} 计算桩的单位侧摩阻力和单位桩端阻力的方 法。Eslami 和 Fellenius^[14]提出了直接利用 CPTU 测 试法来估算桩承载力。Takesue 等^[15] 的 CPTU 方法 中 桩的单位侧摩阻力通过 CPTU 测试的侧摩擦力和 超孔隙水压力(Δu) 而变化。对于黏土,单位桩端阻 力可以直接由有效锥尖阻力得到。可见考虑孔压的 承载力预测方法具有广阔前景。

本文采用考虑孔压效应修正锥尖阻力法来预测 桩基承载力,通过不同土层条件下 SCPTU 试验和临 近桩基资料确定修正系数。基于修正有效锥尖阻力 得出单位桩端阻力

$$q_{\rm b} = C_{\rm b} q_{\rm e} \tag{8}$$

式中, C_b为单位桩端阻力系数。

 $C_{\rm b}$ 可同承载力因数 $N_{\rm c}$ 和经验圆锥系数 $N_{\rm ke}$ 建立 关系。而 $N_{\rm ke}$ 通常可以用于计算不排水抗剪强度 $S_{\rm u}$ 。 Senneset 等^[16] 得出 $N_{\rm ke} = 6 \sim 12$ 。Lunne 等^[17] 表明 $N_{\rm ke}$ 在 1 ~ 13 范围内变化。因此 具有下述关系

$$C_{\rm b} = \frac{N_{\rm c}}{N_{\rm ke}} \tag{9}$$

式中 C_b 分析结果见表 1。

表1中N_{ke}值基于桩尖位置十字板不排水抗剪强 度S_u值计算。所得到N_{ke}值与Lunne等^[18]一致性较 好。

根据 Salgado^[19]的研究,砂土中桩单位端阻力 (q_b)与 CPT 侧壁摩阻力(q_c)具有一一对应关系。 Eslami 和 Fellenius 研究表明^[14], C_b 可以取 1。本文 依此进行计算。 通过实测不同深度处桩身轴力,建立桩侧摩阻力 f_p 、SCPTU 侧壁摩阻力 (f_s) 和贯入过程中超孔隙水压 力 $(u_2 - u_0)$ 间关系。其它非均质海陆交互相软土、海 相黏土、砂土和混合土层条件中的打入式、静压式 PHC、PTC 管桩如图 3 所示。

表1 $C_{\rm b}$ 和 $N_{\rm e}$ 分析值

Table 1	Calculated	values	of	$C_{\rm h}$	and	N_{c}
				- D		

				桩 型		
参	数	PTC - 500	PTC - 400	CFG – 400	PHC - 500	PHC - 600
		(锤击法)	(锤击法)	(套管法)	(锤击法)	(静压法)
С	b	0. 48	0. 55	0.61	0.51	0.39
N	ke	16.5	18.9	17.8	18.2	14.8
Ν	c	8.1	10.2	10.9	9.2	5.8



图 3 由侧摩阻力 f_s 和 $u_2 - u_0$ 确定桩侧摩阻力 f_p



由图 3 可知 ,超孔压(Δu_2) 和 f_p / f_s 的非线性关系为

 $f_{\rm p} = (1.101\ 04\ \times\ 1.001\ 43^{u_2-u_0})f_{\rm s}$ (10)

施工方式和贯入速率差异以及桩和摩擦套筒间 差异可能是 f_p/f_s > 1 的主要因素。单位侧阻和单位 桩端阻力分别乘以桩周面积和桩底面积可得到桩侧 壁摩阻力和桩端阻力 ,本文拟采用上述方法对承载力 进行估算。应用统计分析法进行评价 ,由现场静载荷 试验对轴向荷载响应进行验证。

2.2 预测承载力方法效果评价

采用如下方法进行预测效果评价:

(1) 计算与实测承载力比值 Q_p/Q_m的最佳拟和
 线方程 采用相应的相关系数 R²。

(2)统计分析将提供对评价结果更好的分析。 对目前资料,将 Q_p/Q_m以递增顺序排列,确定累积概 率。

① 在概率 P = 50% 的 Q_p/Q_m 值是桩承载力高估 或低估趋势的测试 ,这个比值越接近于 1 ,一致性越 好。

② 效果好的方法对数正态分布数据将分布在一

条直线上。

③ 通过累计概率数据点的直线斜率对离散或标 准差进行测试。直线越平缓,一致性越好。

3 工程实例

试验采用东南大学岩土工程研究所引进的美国 Vertek – Hogentogler 多功能数字式车载 CPTU 系统, 配备了多功能测试探头、E4FCS 数据采集系统及处理 软件。探头规格: 锥角 60°, 淮底截面积 10 cm², 摩擦 筒表面积 150 cm², 孔压透水元件厚度 5 mm, 位于锥 肩位置(u_2 位置), 贯入速率 2 cm/s, 沿深度每 5 cm 测 试一组读数。

3.1 冲湖积相刚性桩

常州冲湖积相黏土试验场地位于常宁高速金坛 四标 K62 + 401 断面,属长江三角洲太湖堆积平原 区。采用的桩型为 PHC 和 PTC 管桩,桩径 400~600 mm 桩长 14.5~24.0 m,承载力1 650~3 600 kN。 场地典型 CPTU 试验结果和土层剖面如图 4 所示。 估算桩承载力如图 5 所示。



图 4 常州冲积相场地 CPTU 试验结果示例

Fig. 4 Piezocone profiles at Changzhou site

图 5 中对角线表示计算值和实测桩承载力完美 一致,虚线代表偏移 ± 20% 范围。3 种方法相关系数 为 0. 97~0. 99 ,表明各种基于 CPTU 预测方法离散性 较小。新方法和 Eslami and Fellenius 法估算的承载 力低估了承载力,但低估程度很小,可当作安全储备; 而 Takesue 法拟和线高估了承载力。3 种方法估算的 承载力都接近实测值,表明估算法符合桩实际工况, 满足工程要求。

不同方法 Q_p/Q_m 值累计概率如图 6 所示。对应 于 50% 的概率 , Q_p/Q_m 值越接近于 1 ,表明该方法效 果好。3 种方法中 Takesue 的预测法对应 50% 的概 率为 1.03 ,Eslami and Fellenius 的预测法对应 50% 的 概率为 0.95 ,新方法 Q_p/Q_m 值为 0.99 ,略小于 1 ,具有 倾向于低估趋势。新方法累计概率图比其它两种方 法更加平缓 ,即直线斜率小 ,表明新方法有更小的离 散性。







Fig. 6 The probability of different estimation methods

图 7 表明,新方法比其它两种方法更接近于对数 正态分布,且曲线下包围面积最大,具有更高可靠性。 3.2 海陆交互相刚性桩

上海崇明至启东长江公路大桥(江苏)接线工程 位于典型的海陆交互相地层。图 8 为典型的海陆交 互相场地土 SCPTU 测试结果 深部软土层 ,锥尖阻力 和侧壁摩阻力相比上层土小而孔压增大很多 ,软土间 常夹有多层砂土夹层或透镜体(图 8 中约 19 m 处软 土中砂土夹层)。



图 7 不同估算法的对数正态分布

Fig. 7 Different estimation of lognormal distribution







采用 PHC 管桩,桩长为 29 m,桩径为 0.5 m,壁 厚为 100 mm。计算时泊松比取 0.3,沉降影响系数 为 0.035 剪切波速为 203 m/s,土弹性模量最大值 *E*₀ 为 99.55 MPa。实测单桩极限承载力 2 500 kN,新方 法计算值为 2 350 kN。

预测荷载 - 位移 - 承载力关系如图9所示。桩 身弹性变形曲线前段部分(约1500kN前)与预测值 完全一致,弹塑性变形后段部分直至加载破坏,一致 性较好,但预测值略小于实测值,表明弹性变形所占 比例较大,这为工程设计提供了必要的安全储备。





Fig. 9 The load-deformation response in the interactive marine and terrestrial deposit soil

基于 SCPTU 指标估算结果和实测值一致性表现 良好 桩工作时,所作用荷载远小于极限值 桩身变形 以弹性为主 特别是对工程桩进行验证时,所施加荷 载按特征值乘以相应系数确定,多数情况下不会出现 破坏,故基于 SCPTU 简化的弹性分析方法可以快速、 经济、可靠地进行轴向荷载响应分析。

4 结 论

(1) 新方法及 Eslami and Fellenius 法低估了承载 力,可认为是安全储备,Takesue 法高估了承载力。考 虑孔压修正的估算法更符合实际工况,能满足工程应 用要求。

(2)新方法累计概率图平缓离、散性小,更接近 于对数正态分布,具有更高可靠性。

(3)修正双曲线模型模量衰减法计算不同荷载 水平下的弹性模型具有实用性。

(4) 工程实例表明该方法可对荷载 – 位移 – 承 载力进行较准确预测,应用于工程桩效果较好。

参考文献:

[1] O'Neill M W ,Reese L C. Drilled shafts: construction procedures & design methods [M]. Dallas: ADSC ,1999.

- [2] Burns S E Mayne P W. Small- and high-strain soil properties using the seismic piezocone [M]. Washington D C: National Academy Press 1996.
- [3] 蔡国军,刘松玉,童立元,等.现代数字式多功能 CPTU 与中国 CPT 对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3): 914-928.

Cai Guojun ,Liu Songyu ,Tong Liyuan ,et al. Comparative performance of the international 10 cm² piezocone and China 15 cm² CPT of quaternary clay deposits in Jiangsu [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009 28(3):914 – 928.

- [4] Cai G J ,Liu S Y ,Tong L Y ,et al. Assessment of direct CPT and CP– TU methods for predicting the ultimate bearing capacity of single pile
 [J]. Engineering Geology 2009 ,104(3-4):211-222.
- [5] Abu-Farsakh M Y ,Titi H H. Assessment of direct cone penetration test methods for predicting the ultimate capacity of friction driven piles [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering ,ASCE 2004 ,130(9):935-944.
- [6] 苗永红 陆建飞 赵 翔. 饱和土中单桩的数值计算及实测分析
 [J]. 煤炭学报 2007 32(2):127-130.
 Miao Yonghong Lu Jianfei Zhao Xiang. The numerical computation and actual measurement analysis of single pile in saturated soil[J].
 Journal of China Coal Society 2007 32(2):127-130.
- [7] Randolph M F ,Wroth C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division , 1978 ,104(GT12):1465-1488.
- [8] Randolph M F ,Wroth C P. A simple approach to pile design and the evaluation of pile tests [A]. Behavior of Deep Foundations ,STP 670 ,ASTM[C]. West Conshohocken/PA ,1979: 484 - 499.
- [9] Poulos H G ,Davis E H. Pile foundation analysis and design [M]. New York: Wiley & Sons ,1980.
- [10] Burland J B. Small is beautiful: the stiffness of soils at small strains

[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1989 26(4):499-516.

- [11] LoPresti D C F ,Pallara O ,Lancellotta R ,et al. Monotonic and cyclic loading behavior of two sands at small strains [J]. ASTM Geotechnical Testing Journal ,1993 ,16(4): 409 - 424.
- [12] LoPresti D C F ,Pallara O ,Puci I. A modified commercial triaxial testing system for small-strain measurements [J]. ASTM Geotechnical Testing Journal ,1995 ,18(1):15-31.
- [13] Almeida M S S , Danziger F A B , Lunne T. Use of the piezocone test to predict the axial capacity of driven and jacked piles in clay [J]. Canadian Geotechnical Journal ,1996 33(1):23-41.
- [14] Eslami A ,Fellenius B H. Pile capacity by direct CPT and CPTU methods applied to 102 case histories [J]. Canadian Geotechnical Journal ,1997 34(6): 886 - 904.
- [15] Takesue K ,Sasao H ,Matsumoto T. Correlation between ultimate

pile skin friction and CPT data[J]. Balkema ,Rotterdam: Geotechnical Site Characterization ,1998 2:1 177 -1 182.

- [16] Senneset K Sandven R Janbu N. Evaluation of soil parameters from piezocone tests [R]. Washington D C: Transportation Research Board National Research Council J989: 24 - 37.
- [17] Lunne T , Christophersen H P , Tjelta T I. Engineering use of piezocone data in North Sea clays [A]. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C]. San Francisco , Rotterdam: Balkema Pub. , 1985.
- [18] Lunne T ,Robertson P K ,Powell J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice [M]. UK: Blackie Academic & Professional , 1997: 50 – 56.
- [19] Salgado R. Analysis of penetration resistance in sands [D]. Berkeley Calif.: University of California ,1993.

2011年《煤炭学报》征订启事

《煤炭学报》是中国煤炭学会主办的、向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤 田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环 境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文,以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结,也刊载重要学 术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被Ei、IEA Coal Abstract CD-ROM、中国科学 引文数据库、科学技术文摘速报(日本)、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系 统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北 京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等 奖 获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获首届国家期刊奖。2004 2007 2010 年分别入选第 三、第六和第九届百种中国杰出学术期刊。2008 年荣获"中国精品科技期刊"称号。2009 年荣获"新中国 60 年有影响力的期刊"称号。

《煤炭学报》深受广大作者、读者的爱护和支持,也受到各级部门的重视,在学术水平上具有较高的地位, 很多单位都将在《煤炭学报》发表的论文作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊,每期176页,每册订价58元,全年共收费696元。欲订阅者可直接与本编辑部联系, 编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码:100013

联系电话: (010) 84262930 联系人:毕永华

E – mail: mtxbbyh@126. com