

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.01.016

苏通大桥群桩基础应力扩散角反演分析

薛 涛¹, 刘文淑², 姚宇阒¹, 陈志坚¹, 万许辉¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093)

摘要: 等代墩基法是群桩沉降计算的一种简化模式, 在计算超长大直径钻孔灌注群桩基础最终沉降量时, 得到的理论值往往偏大, 经沉降经验系数修正后其值又偏小, 而且按照从外围基桩以 $\bar{\varphi}/4$ ($\bar{\varphi}$ 为平均摩擦角) 来考虑应力扩散作用显然不适用于深水群桩基础沉降计算. 鉴于此, 利用苏通大桥地基基础安全监测系统实时在线监测数据, 考虑钢护筒与桩身共同作用, 采用等代墩基法模型反演不同施工阶段应力扩散角, 得到荷载传递过程中应力扩散角随时间的变化规律, 从而给出用等代墩基法计算深水群桩基础沉降时应力扩散角的取值范围, 为桩基设计提供一定的理论依据.

关键词: 苏通大桥; 群桩基础; 等代墩基法; 沉降; 应力扩散角; 在线监测

中图分类号: U443.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)01-0076-04

为了满足承载力、沉降以及整体稳定性的要求, 大型建筑、道路桥梁等工程的桩基往往设计为群桩基础. 然而, 群桩基础沉降变形性状在荷载传递过程中因承台、桩、土的相互作用会变得非常复杂, 国内外学者也因此对群桩沉降计算方法进行了大量的研究^[1-5].

事实上, 工程建设中广泛采用的是规范推荐的等代墩基法^[6-8]. 该法是群桩沉降计算的一种简化模式. 考虑到深基础的荷载-沉降关系与浅基础不同, 各规范^[9-11]都从附加应力分布、附加应力扩散、实体基础底面位置等方面做了相应修正. 但该模式假定等代范围内的桩间土不产生压缩变形, 不考虑桩身压缩量, 桩侧阻力扩散由放大的等代墩基替代, 且应力扩散角通常按 $\bar{\varphi}/4$ ($\bar{\varphi}$ 为平均摩擦角) 取值, 这就使得理论计算结果较实测值偏大.

本文结合苏通大桥的工程特点, 针对其超大群桩基础沉降计算中的一些问题, 利用信息化监测系统的结果, 在对桩端压力盒实测数据进行计算、修正的基础上, 考虑钢护筒的共同作用、冲刷防护层对地基土层的改良作用、桩端后压浆对桩底土层的挤密作用^[12]等来反演沉降变形过程中的应力扩散角, 从而分析应力扩散角随时间的变化规律, 并给出用等代墩基法计算群桩基础沉降时应力扩散角的取值范围.

1 等代墩基法计算模型及反演过程推导

1.1 等代墩基法模型

苏通大桥采用主跨 1088 m 的双塔双索面斜拉桥, 其主塔基础由 131 根长约 120 m 的 D2.8 m/D2.5 m 钻孔灌注桩组成, 自重约 1.0 GN, 从而形成目前世界上最大的高桩承台群桩基础^[5]. 用等代墩基法对该基础进行沉降计算时, 考虑群桩外围侧面剪应力的扩散作用, 扩散角从桩土交界处外围按 $\bar{\varphi}/4$ 向下扩散, 且假想实体深基础底面相交的面积为实体深基础的底面积 F (在此视为矩形布置的群桩基础), 其模型可表示为

$$F = a'b' = \left(a + 2l \tan \frac{\bar{\varphi}}{4} \right) \left(b + 2l \tan \frac{\bar{\varphi}}{4} \right) \quad (1)$$

式中: a, b ——群桩桩顶外围矩形面积的长度和宽度; a', b' ——假想实体深基础桩底面积扩大后的长度和宽度; l ——入土部分的桩长.

1.2 群桩基础沉降计算参数反演过程

苏通大桥群桩基础处于深水环境, 河床面以上基桩自由段长达 19 m, 加之河床覆盖层松软, 故基桩上部

设置 55 m 长、壁厚 25 mm 的钢护筒 ,并作为永久性结构参与桩基础共同受力 .因此 ,在推导反演公式前 ,给出以下假定 (a)哑铃型群桩基础概化为矩形基础 (b)等代墩基础基底附加应力近似等于群桩基础桩底附加应力(即实测附加应力) (c)设置钢护筒段土层的摩擦角无提高作用 ,即扩散角的提高是由钢护筒底面以下土层摩擦角的提高作用形成的 .

按国内规范^[9-11]通用公式 ,桩端基底附加压力计算公式为(注 :不同规范对于 N 的取值有所不同)

$$p_z = N/A$$

(2)

式中 : p_z ——桩端基底附加应力 ; N ——上部结构荷载 ; A ——桩端底面积 .

由此推出

$$F = N/p$$

(3)

式中 : p ——实测基底附加压力 ; F ——扩散后的基础底面积 .

联立式(1) (3)得

$$N/P = (a + 2l\tan\alpha)(b + 2l\tan\alpha)$$

(4)

解得 α ,则摩擦角 $\bar{\varphi} = 4\alpha$ 即为所求 .其中 α 为扩散角 .

考虑钢护筒所在桩身不涉及桩周土的加强作用 ,而钢护筒下部桩身涉及桩周土的加强作用 .由于

$$\bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} = \frac{\varphi_1 l_1 + \varphi_2 l_2 + \cdots + \varphi_{k-1} l_{k-1}}{l} + (1 + \eta) \frac{\varphi_k l_k + \varphi_{k+1} l_{k+1} + \cdots + \varphi_n l_n}{l}$$

(5)

其中 :钢护筒段桩身摩擦角为 $\varphi' = \frac{\varphi_1 l_1 + \varphi_2 l_2 + \cdots + \varphi_{k-1} l_{k-1}}{l}$;钢护筒下部土层摩擦角为 $\varphi'' = \frac{\varphi_k l_k + \varphi_{k+1} l_{k+1} + \cdots + \varphi_n l_n}{l}$.

由此可得摩擦角提高系数

$$\eta = (\bar{\varphi} - \varphi' - \varphi'') / \varphi''$$

(6)

式中 : φ_i ——第 i 层土的摩擦角 , $i = 1, 2, \cdots, k-1, k, \cdots, n$; η ——摩擦角提高系数 ; l_i ——第 i 层土中桩的伸入长度 , $i = 1, 2, \cdots, k-1, k, \cdots, n$.

2 应用实例及分析

苏通大桥主 4 号墩基桩监测始于 2004 年 7 月 ,考虑到外加荷载的准确性和实测数据的完整性 ,选择 2005 年 1 月 11 日钢套筒抽水后到 2007 年 8 月 13 日成桥后这段时间的实测数据作为分析依据 .由于传感器实测数据会受到大气温度、日照辐射、风、水流、潮位等环境因素的影响 ,因此要对实测数据进行预处理 ,并对计算后的桩端应力值进行修正 .对于测值变化较大的异常值 ,通过绘制监测响应量的时间过程曲线 ,并依据经验判别法直接消除 .而对于那些变化不明显且规律性较强的异常值 ,本文通过以下修正手段进行消除 .

首先为了消除水流、温度及风对应力大小的影响 ,以承台纵向轴线为对称轴 ,将 1 号和 77 号桩测点、29 号和 100 号桩测点、64 号和 126 号桩测点的应力值进行算术平均 ;其次以承台横桥向中心轴为对称轴将南、北两侧的应力值进行算术平均 ,以消除太阳直射及风对桩端附加应力的影响 ;最后根据不同工况潮位变化对桩端附加应力测值和荷载进行修正 ,用水头变化修正压力盒测值所受潮位的影响 ,用浮力修正上部荷载所受潮位的影响 .水头变化对桩底孔隙水压力具有一定的影响 ,因此分析压力盒潮位影响时须用水头变化乘以水头影响系数来修正测值 .经过相同工况不同潮位的桩底压力盒数据的对比分析 ,得出本工程地质条件下水头影响系数为 0.1 .通过以上处理可以得到不同工况下的桩端平均附加应力 .再根据推导出的公式计算内摩擦角的提高系数 ,计算结果见表 1 .

由表 1 可以看出 ,随着施工进度的变化 ,基底附加应力呈增长趋势 ,应力扩散角却逐渐减小 .因为在施工过程中 ,随着荷载的逐渐增加和时间的推移 ,桩间土及其周

表 1 计算结果

Table 1 Calculated results

工况	荷载/ kN	基底附加 应力/kPa	扩散角 $\alpha(^{\circ})$	扩散角提高 系数	摩擦角提高 系数
承台施工完	1 116 422.2	0.072	14.19	1.68	1.06
索塔 50 节浇筑完	1 764 026.6	0.116	13.86	1.64	1.00
索塔施工完	1 857 285.8	0.131	12.84	1.52	0.81
大桥合拢后	2 182 494.3	0.156	12.59	1.49	0.77
成桥后	2 182 494.3	0.157	12.45	1.47	0.74

围土层在超孔隙水压力作用下不断发生排水固结作用,基础不断沉降,基础土层应力状态不断发生变化,进而导致等代墩基础扩散角不断发生变化,并且变化趋势越来越小,最终将会稳定在某个特定值上。

鉴于此,等代墩基法模型的应力扩散角也在不断发生变化,扩散角提高系数及摩擦角提高系数 η 随时间变化及函数拟合曲线分别如图1和图2所示。

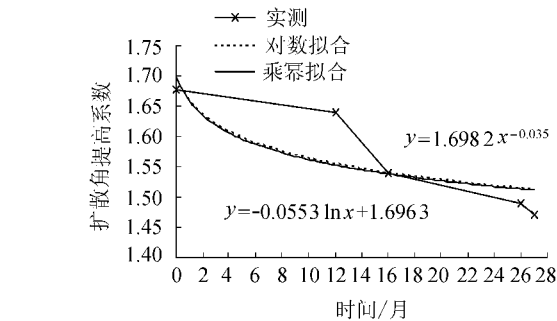


图1 应力扩散角提高系数随时间变化曲线
Fig. 1 Variation of increasing coefficient of stress diffusion angle with time

为了获取应力扩散角的取值范围,按设计期限100a对所得扩散角提高系数分别进行了对数和乘幂的函数拟合(图1),由此得到的提高系数分别是1.30和1.32,综合考虑后,将该基础的扩散角提高系数取为1.3。同时对 η 取值也分别做了对数和乘幂的函数拟合(图2),按设计期限100a进行计算,得出的 η 值分别是0.48和0.56,因此 η 取值为0.4~0.6。

以苏通大桥主5号墩群桩基础在线监测数据对上述反演结果进行了验证,结果见表2。

由表2可以看出,利用本文反演结果计算得出的基底附加应力与实测值比较接近,这对于超大群桩基础沉降变形计算研究很有意义。

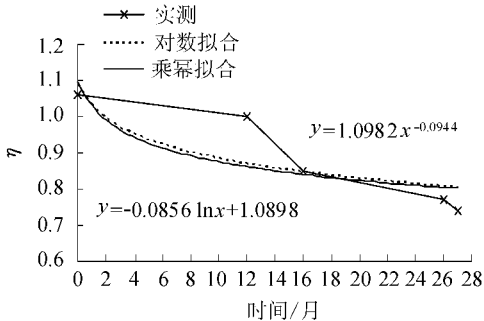


图2 摩擦角提高系数 η 随时间变化曲线
Fig. 2 Variation of increasing coefficient η of friction angle with time

Table 2 Comparison of calculated parameters				
方 法	荷载/kN	扩散角 $\alpha/(^{\circ})$	基底附加 应力/kPa	基底附加应力 计算与实测 相对误差/%
按规范计算	2 182 510	6.876	295	14.53
按反演计算	2 182 510	8.939	252	3.12
实 测	2 182 510		260	

3 结 论

- a. 应力扩散角的变化是基础土层应力状态不断发生变化的结果。
- b. 苏通大桥主4号墩计算结果显示,反演计算后的扩散角相对于规范计算扩散角有较大的提高。实际应用中若按规范取 $\bar{\varphi}/4$ 的扩散角进行计算,则须对钢护筒以下的土层摩擦角进行修正,修正系数为 $(1+\eta)$, η 取值为0.4~0.6。
- c. 利用反演得到的应力扩散角来计算桩底附加应力,所得结果与实测值比较接近,能比较真实地反映基底实际受力情况,并且利用此值计算出的群桩基础沉降也与实测值比较接近。
- d. 反演群桩基础应力扩散角时,实测数据的精度尤为重要,故还需进一步研究数据的信噪分离技术。

参考文献:

[1] 田美存,徐永福.荷载传递法在群桩分析中的应用[J].河海大学学报,1997,25(1):62-67.(TIAN Mei-cun,XU Yong-fu. Application of load transfer method to analysis of group piles[J].Journal of Hohai University,1997,25(1):62-67.(in Chinese))

[2] FRANCESCO C,MICHELE M. Simplified nonlinear analysis for settlement prediction of pile groups[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2002,128(1):76-84.

[3] 林琼,叶邦庆,司漪,等.桩土刚度比对群桩沉降的影响[J].河海大学学报:自然科学版,1999,27(增刊1):120-123.(LIN Qiong,YE Bang-qing,SI Yi,et al. The influence of pile-soil stiffness ratio on the settlement of pile groups[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,1999,27(S1):120-123.(in Chinese))

[4] 陈振建,王建华,史丽军.承台刚性变化对群桩沉降的影响[J].河海大学学报:自然科学版,1999,27(增刊1):124-127.(CHEN Zhen-jian,WANG Jian-hua,SHI Li-jun. The influence of pile cap stiffness change on the settlement of pile group[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,1999,27(S1):124-127.(in Chinese))

[5] 张雄文,董学武,李镇.苏通大桥主塔墩基础群桩效应研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(2):200-203.(ZHANG Xiong-wen ,DONG Xue-wu ,LI Zhen. Pile group effect of main pylon foundation of Sutong Bridge[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2006 ,34(2) 200-203.(in Chinese))

[6] 胡德贵,罗书学,赵善锐.竖向荷载作用下群桩沉降的一种实用计算方法[J].四川建筑科学研究,2001,27(2):32-33.(HU De-gui ,LUO Shu-xue ,ZHAO Shan-rui. An approach for settlement prediction of vertically loaded pile group[J]. Building Science Research of Sichuan ,2001 ,27(2) 32-33.(in Chinese))

[7] 韩煊,李勣,李宁.北京采用等代墩基法计算桩基础沉降的适宜性分析[J].西部探矿工程,2005,11:19-21.(HAN Xuan ,LI Meng ,LI Ning. Suitability analysis about the settlement of pile groups calculated by using equivalent pier method adopted by Beijing[J]. West-China Exploration Engineering ,2005 ,11 :19-21.(in Chinese))

[8] 邓友生,龚维明,袁爱民.超长大直径群桩沉降计算方法探讨[J].铁道学报,2007,29(4):87-90.(DENG You-sheng ,GONG Wei-ming ,YUAN Ai-min. Research on calculating methods for settlement of extra-long large-diameter pile group[J]. Journal of the China Railway Society ,2007 ,29(4) 87-90.(in Chinese))

[9] GJG 94—94,建筑桩基技术规范[S].

[10] GB 50007—2002,建筑地基基础设计规范[S].

[11] JTJ 024—85,公路桥涵地基与基础设计规范[S].

[12] 陈志坚,韩学伟,白炳东.大直径超长钻孔灌注桩桩端后压浆机理探讨[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(4):409-412.(CHEN Zhi-jian ,HAN Xue-wei ,BAI Bing-dong. Discussion on post grouting mechanism at end of super long large-diameter bored pile[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2007 ,35(4) 409-412.(in Chinese))

Back analysis of stress diffusion angle for foundation with pile groups of Suzhou-Nantong Bridge

XUE Tao¹ , LIU Wen-shu² , YAO Yu-tian¹ , CHEN Zhi-jian¹ , WAN Xu-hui¹

(1. College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Department of Earth Science , Nanjing University , Nanjing 210093 , China)

Abstract : The equivalent pier method is a simplified model for calculating the settlement of a foundation with pile groups. However , the calculated final settlement of the foundation with super-long large-diameter drilled bored pile groups is much larger , and it is much smaller after modified by empirical coefficients. Meanwhile , it is not suitable to calculate the settlement of deep-water foundations with pile groups according to the stress diffusion angle $\bar{\varphi}/4$ ($\bar{\varphi}$ is the average friction angle) of the outside piles. Therefore , using the real-time online data of the foundation safety monitoring system of the Suzhou-Nantong Bridge and the interaction between the steel casing and the piles , the stress diffusion angle at different construction stages was back analyzed through the equivalent pier method model. The variation patterns of the stress diffusion angle over time were obtained during the load transfer process. Furthermore , the range of the stress diffusion angle was proposed for the calculation of the settlement of the deep-water foundation with pile groups using the equivalent pier method , providing a theoretical basis for the design of pile foundations.

Key words : Suzhou-Nantong Bridge ; foundation with pile groups ; equivalent pier method ; settlement ; stress diffusion angle ; online monitoring