

苏通大桥主塔墩基础群桩效应研究

张雄文¹ 董学武² 李 镇²

(1. 河海大学土木工程学院 , 江苏 南京 210098 ; 2. 江苏省苏通大桥建设指挥部 , 江苏 南通 226010)

摘要 : 在苏通大桥主塔墩群桩基础与土体共同作用三维非线性有限元方法分析的基础上 , 研究了群桩效应对高桩承台底面受力与变形特性、基桩轴力分布、桩侧摩阻力、桩底土附加应力的影响以及桩数变化对群桩效率系数的影响 , 拟合得出了苏通大桥基桩轴力和群桩效率系数的计算方法。结果表明 , 在桩径和桩距一定的条件下 , 群桩效率系数的变化幅度随桩数的增加逐渐减小 , 并最终趋于定值。

关键词 : 苏通大桥 ; 非线性有限元 ; 邓肯-张模型 ; 接触面单元 ; 群桩效应 ; 高桩承台

中图分类号 : TU473.1 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-198X(2006)02-0200-04

桩基础在大型建筑、道路桥梁、港口码头等工程中的应用十分广泛。为了满足承载力、沉降以及整体稳定性的要求 , 桩基往往被设计为群桩基础。如桥梁工程需要刚度较大的承台将巨大的上部荷载传递给基桩。由于受到防洪、河势、船舶撞击以及施工等方面的限制 , 基础承台的尺寸有限 , 对于需要承受巨大上部荷载的群桩基础 , 往往具有超长、大直径、密集布桩等特点 , 因此不可避免地存在群桩效应。对于钻孔灌注桩 , 群桩效应往往导致基础承载力的损失以及沉降和不均匀沉降的增加。因此 , 由承载力及沉降要求决定的桩基布置形式及其引起的群桩效应是相互制约、相互影响的矛盾的两方面^[1-3]。为了研究群桩效应与桩基础布置形式及其受力变形之间的相互关系 , 必须分析桩基础与土体之间的共同作用。本文基于三维非线性有限元方法 , 从结构与土体共同作用着手研究苏通大桥主塔墩基础群桩效应。

1 群桩基础及其地基土的组成结构

苏通大桥位于江苏省东南部 , 连接苏州、南通 2 市 , 是沈阳至海口国家重点干线公路跨越长江的重要通道。苏通大桥主桥为跨径 1088 m 的斜拉桥 , 主塔为混凝土塔 , 高约 300 m , 均属世界之最。主塔墩基础由 131 根长约 120 m、间距 6.75 m 的变径(上段直径为 2.8 m、下段直径为 2.5 m)的钻孔灌注桩组成 , 承台为变截面、变厚度的“哑铃形”混凝土结构 , 平面尺寸为 113.7 m × 48.1 m(图 1) , 自重约 1.0 GN , 属目前世界上规模最大的群桩基础 , 运营期需安全承受约 1.1 GN 的竖向荷载。

苏通大桥桥区水深流急 , 地质条件复杂 , 河床覆盖层深厚 , 基岩面标高在 - 270 m 以下。河床覆盖层为浅海、滨海、泻湖、河湖相的地层 , 相变和厚度变化均较大 , 共由 22 个工程地质岩组组成。与桩基础关系密切的各岩组的主要特征可归纳为 : 第 1 层为北侧上部的粉砂或亚黏土夹粉砂 , 第 2 层为南侧上部的亚黏土硬壳层 , 第 3 层为南侧上部的淤泥质亚黏土 , 第 4 层为亚黏土 , 第 5 层以粉砂为主 , 第 6 层为含砾粗砂 , 第 7 层为细砂与粉砂互层 , 第 8 层为粗砂夹细砂 , 第 9 ~ 15 层为粉、细砂层和黏性土层。

2 非线性土工有限元分析中的关键问题处理

桩基础与地基土共同作用三维非线性有限元分析结果的合理性与可靠性依赖于计算模型与参数的正确

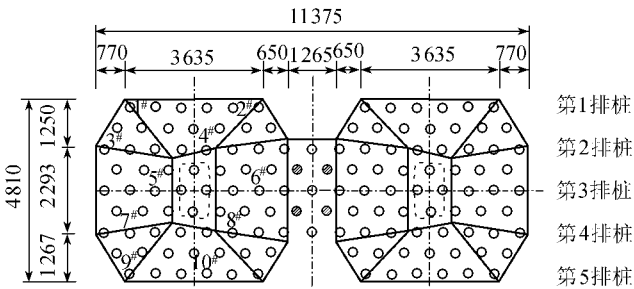


图 1 苏通大桥主塔墩基础一般构造(单位 : mm)
Fig.1 Structure of main pylon foundation
of Sutong Bridge

选取.在苏通大桥主塔墩基础群桩效应分析中,需侧重解决以下几方面问题^[4].

2.1 地基土固结效应的正确模拟

土体与岩体及混凝土等固体材料的本质区别之一是其变形主要取决于土的固结.地基土固结过程非线性特性的正确描述对土体应力、变形特性的准确模拟具有重要影响.因此,对地基土固结作用分析宜采用三维固结理论,即比奥固结理论.在固结过程中,地基土不断被压密,而工程荷载是分级施加的,因此,必须正确模拟固结过程中地基土材料参数的不断变化.大量工程实践表明,邓肯-张模型可以较好地模拟地基土的这种非线性特征^[4-6].根据苏通大桥地基土的特点和工程施工过程,在分析群桩、承台、地基土共同作用时选用了基于比奥固结理论的邓肯-张模型^[4-5].

2.2 单元的选择和计算网格的划分

对于大型钻孔灌注桩群桩基础,基桩数量多,为了减小计算工作量,对基桩多采用杆单元进行模拟.但考虑到桩径较大以及灌注桩施工工艺和方法等因素的影响,为了更合理地设置接触面单元以反映桩与土之间的受力变形特性,计算中地基土和混凝土桩均采用实体单元进行模拟.计算网格是影响计算精度的重要因素.考虑到苏通大桥主塔墩基桩多且长,网格划分太密会导致计算工作量巨大,因此,网格划分时既要保证计算结果的精度又必须合理控制计算规模.根据勘察资料,计算范围取为基础尺寸的 2.5 倍,并利用结构的对称性.计算网格如图 2 所示.不同网格疏密程度的有限元计算结果对比分析表明,该网格能够保证足够的精度.边界条件选为位移约束.

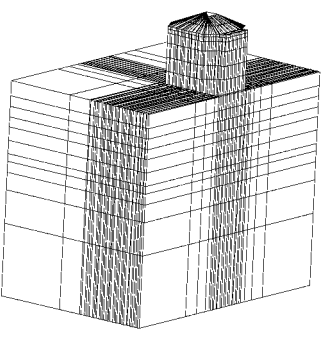


图 2 计算网格划分
Fig.2 Sketch of meshing for computation

2.3 接触面单元的选用

由于本文模拟的基桩为摩擦桩,且需考虑灌注桩的护壁泥皮以及成孔过程中桩周土的扰动,因此,有限元分析时桩土之间接触面的模拟十分必要^[7-8].考虑到无厚度的 Goodman 单元只能模拟桩土之间的错动,本文计算时采用能在一定程度上综合反映接触错动、护壁泥皮以及施工扰动影响(使桩周土强度、模量降低)的薄层单元,其厚度取为 0.5 m(一般取土体单元长度的 1/100~1/10,本文计算分别比较了 1.16 m、0.50 m 和 0.30 m 3 种单元).

2.4 计算参数的选取

作为工程体,将桩基础混凝土视为线弹性材料是合适的.计算时取承台混凝土弹性模量为 31.5 GPa,基桩的弹性模量为 33 GPa,泊松比为 0.167,密度取为 2 449 kg/m³.地基土的邓肯-张模型参数由三轴试验确定,其值见表 1.

表 1 苏通大桥主塔墩基础与土体共同作用三维非线性有限元分析计算参数取值

材料	R_f	K	n	G	F	D	K_{ur}	土体内 摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	土体黏聚力 c/kPa	密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
粉细砂	0.84	320	0.61	0.40	0	0	480	31.3	24.0	1 000
中粗砾砂	0.80	660	0.55	0.40	0	0	1 000	34.1	10.0	1 143
黏土	0.80	370	0.59	0.38	0	0	500	27.7	29.5	1 102
接触面	0.90	100	0.66	0.40	0	0	150	20.0	10.0	1 122
桩尖土体	0.80	370	0.59	0.38	0	0	500	27.7	29.5	1 102

注: $R_f, K, n, G, F, D, K_{ur}$ 为三轴试验测得的邓肯-张模型参数.

3 主塔墩基础群桩效应分析

3.1 承台应力和沉降分析

本次考虑的计算工况分别有:承台及索塔浇注、钢箱梁吊装、桥面铺装和通车运营.其中,运营期承台底面应力和沉降等值线如图 3 所示.计算结果表明,承台底面中心承受拉应力,最大值为 0.2 MPa;承台周边承受压应力,最大值为 3.0 MPa.此外,桩顶处承台承受压应力,桩间承台混凝土承受拉应力.中心桩沉降量最大,达 26.0 mm,角桩沉降量最小,为 20 mm.

3.2 桩顶轴力与群桩效应分析

运营期桩顶轴力平面分布如图 4(a)所示,其显著特征是桩顶轴力在平面上的分布具有很强的不均匀性

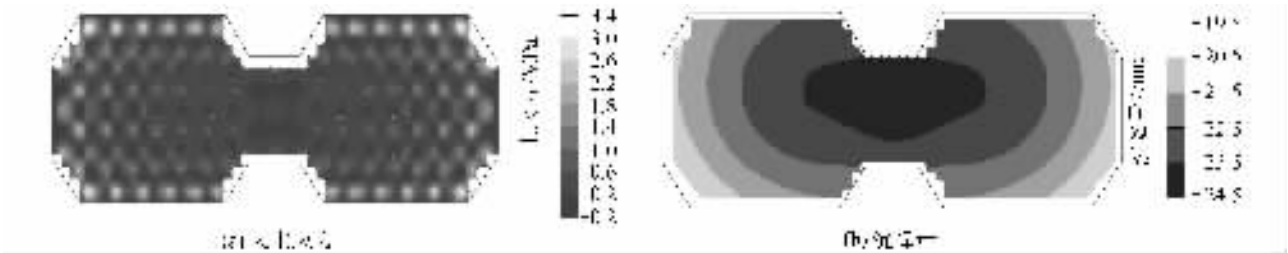


图 3 运营期承台底面等值线

Fig.3 Isoline for bottom surface of pile cap during operation period of Sutong Bridge

(离心模型试验也验证了该规律).周边桩(尤其是角桩)的轴力明显大于中间桩.经与沉降量计算结果(图 3(b))比较,可以认为桩基础的群桩效应十分突出.根据各工况的计算结果,可得到基桩轴力与上部荷载以及基桩位置的关系为

$$N_{ij} = [(-0.03B_{ij}^2 + 0.8B_{ij})10^{-6}l_{ij}^4 + (-0.016B_{ij}^2 - 0.36B_{ij})10^{-7}l_{ij}^3 + (-0.0001B_{ij}^2 - 0.002B_{ij})l_{ij}^2 + 0.0005B_{ij}l_{ij} + 0.45B_{ij} + 10] \frac{P}{P_0} \tag{1}$$

式中: N_{ij} ——第*i*排、第*j*列基桩桩顶轴力; B_{ij} 、 l_{ij} ——第*i*排、第*j*列基桩中心到承台顺桥向与横桥向轴线的距离; P ——各工况下上部荷载; P_0 ——运营期上部荷载,取 1 090 MN.

3.3 桩侧摩阻力的分布与群桩效应

通车运营期间,不同部位基桩桩侧摩阻力分布见图 4(b).由图 4(b)可见:不同部位基桩,桩侧摩阻力发挥程度不同.中心部位基桩(如 4#、5#、6#、7#和 8#桩),其上段桩侧摩阻力的发挥程度大于周边桩(1#、2#、3#、9#和 10#桩).随着埋深增大,周边桩桩侧摩阻力发挥程度逐步增大,而中心部位基桩则相反.在标高-75 m 处(桩埋深 10 m),各基桩桩侧摩阻力发挥接近相同.此后,桩侧摩阻力发挥持续增大,而中心部位基桩桩侧摩阻力的发挥却逐渐减小.在标高-100 m 处(距桩底 17 m),各基桩桩侧摩阻力发挥均有所增加.桩侧摩阻力发挥呈现出上述特征的主要原因是群桩效应.周边桩基桩上部(埋深 10 m 以上)由群桩效应导致的应力叠加比中心部位基桩小.因此,中心部位基桩桩侧摩阻力较大.随着埋深的增加,由群桩效应导致的应力叠加在土体应力中所占的比重增大,从而导致中心部位的基桩与土体的相对位移减小,桩侧摩阻力减小.而这种效应对周边桩的影响明显小于中心部位的基桩.因此,周边桩的桩侧摩阻力持续增大.在接近桩底处,土体的强化效应导致桩侧摩阻力均有所增加.

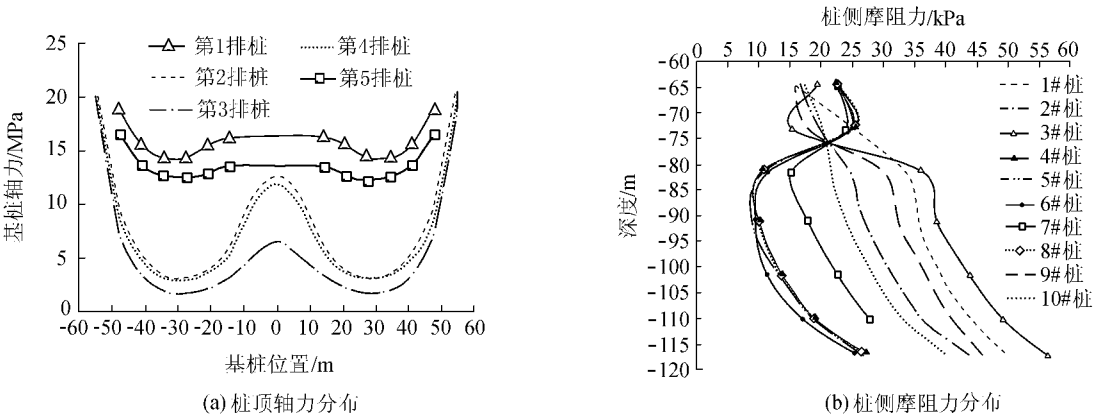


图 4 运营期主塔墩基础桩顶轴力与桩侧摩阻力分布

Fig.4 Axial force distribution in main pylon foundation during operation period of Sutong Bridge

3.4 桩端应力的分布特征

运营期桩端应力分布见图 5.由图 5 可见:虽然桩底土层附加应力仍然较大,但由于突出的群桩效应的影响,其分布较为均匀,其应力状态类似于整体式基础.桩基础的破坏形式以整体失稳为主.因此,控制桩底沉渣厚度对改善桩底土层应力状态并提高桩基础的整体安全度具有重要作用.

3.5 群桩效率系数的确定

在一定的桩距和桩径条件下,为了研究基桩数量对群桩效率的影响,对不同桩数的桩基础进行有限元分

析 结果见表2.据此 拟合得到群桩效率系数与基桩数量的关系： $\eta_k=1-0.044\ln k$ （2）

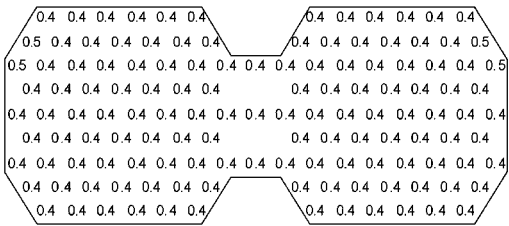


图 5 运营期桩底土附加应力分布(单位 MPa)
Fig.5 Additional stress distribution in soil under pile during operation period of Sutong Bridge

式中： η_k ——群桩效率系数； k ——桩数。
由式（2）可看出，对于苏通大桥主塔墩基础，当桩数小于 19 时，群桩效率系数减小很快；当桩数大于 19 时，随着桩数增加，群桩效率系数减小幅度放缓。

表 2 不同桩数时群桩效率系数

Table 2 Coefficient of pile group efficiency for different numbers of piles

桩数	9	14	19	24	29	34
群桩效率系数	0.900	0.884	0.870	0.860	0.852	0.845
桩数	39	44	49	54	59	64
群桩效率系数	0.839	0.833	0.829	0.824	0.821	0.817

4 结 论

- a. 苏通大桥主塔墩桩基础之承台底面的中心以及基桩中间的混凝土承受拉应力，且拉应力分布不均匀，在承台配筋设计时应重视承台横梁区的重要性。
- b. 群桩效应导致基桩轴力在平面上的分布具有较大的不均匀性，且角桩的桩顶轴力最大，这种不均匀分布特征是桩基础设计优化的重点。
- c. 突出的群桩效应使苏通大桥主塔墩桩基础受力特性类似于整体基础，桩端应力对桩基础的承载力具有重要意义。因此，施工时应严格控制桩底沉渣厚度，并采取有效措施改善桩底土层的力学性能，提高桩基础的安全储备。
- d. 在桩径和桩距一定的条件下，群桩效率系数的变化幅度随桩数的增加逐渐减小，并最终趋于定值。群桩基础设计时应寻求最经济、最合理的布桩形式。

参考文献：

[1] 刘金砺. 竖向荷载下的群桩效应和群桩基础概念设计若干问题[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 78-83.
[2] 刘自明, 王邦楣, 陈开利. 桥梁深水基础[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 80-96.
[3] 高大钊, 赵春风, 徐斌. 桩基础的设计方法与施工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 62-74.
[4] 殷宗泽. 土体本构模型剖析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 95-97.
[5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1996: 44-89.
[6] 施建勇, 赵维炳, 陈文. 土体变形规律研究进展[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(1): 24-26.
[7] DESAI C S, DESAI M M, ZAMAN. Thin-layer element for interfaces and joints[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8: 19-43.
[8] 刘金砺. 竖向荷载下群桩变形性状及沉降计算[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 22-27.

Pile group effect of main pylon foundation of Sutong Bridge

ZHANG Xiong-wen¹, DONG Xue-wu², LI Zhen²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Provincial Sutong Bridge Construction Commanding Department, Nantong 226010, China)

Abstract Based on 3D nonlinear FEM analysis of the interaction between pile group foundation of main pylon of the Sutong Bridge and soil, the influences of pile group effect on the stress and deformation of bottom surface of high-rise pile cap, axial force distribution of piles, friction along piles, and additional stress in soil under piles, and the influence of variation of pile number on the coefficient of pile group efficiency were investigated. The calculation methods for axial force of foundation piles and the coefficient of pile group efficiency were obtained by numerical simulation. The result of study shows that, for piles with certain diameter and span, the variation of the coefficient of pile group efficiency decreases as the number of piles increases, and finally reaches a certain value.

Key words Sutong Bridge; nonlinear FEM; Duncan-Chang model; interface element; pile group effect; high-rise pile cap