

锚桩法单桩静载试验中群桩相互作用及误差分析

周洪波¹, 黄胜生^{2*}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 利用 Poulos 弹性理论法, 对锚桩法单桩静载承载力试验中试桩和锚桩之间的相互作用进行了研究, 提出了考虑锚桩上拔量对试桩 $p-s$ 曲线影响的方法。利用该方法对某工程实测资料进行了分析, 发现采用原始测试数据分析所得出的试桩极限承载力偏于危险, 并为该工程提供了更加合理的单桩极限承载力值。

关 键 词: 锚桩法; 弹性理论法; 单桩承载力; 群桩相互作用

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Interaction and error analysis of pile groups in anchor-pile loading test

ZHOU Hong-bo¹, HUANG Sheng-sheng^{2*}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The interaction between loading pile and anchor-piles in the anchor-pile loading test is studied. A method which based on the Poulos elastic theory to take account of the influences of the interaction on the $P-s$ curves of the loading pile, is presented. Then, the data of a test have been analyzed using this method. The conclusion is that the result from the original data analysis is larger than its actual bearing capacity.

Key words: anchor-pile loading test; elastic theory method; bearing capacity of single pile; interaction of pile group

1 前 言

目前, 桩基础在高层建筑中的应用越来越广泛, 桩基质量检测技术也越来越重要。单桩竖向抗压极限承载力是桩基设计的基本参数, 取得合理准确的单桩极限承载力值是确保建筑物安全、经济的重要因素。单桩竖向静载试验是确定单桩极限承载力的基本方法。根据试验反力的不同, 可分为锚桩反力法和堆载荷重法。一方面堆载荷重法单桩极限承载力试验结果有一些干扰和影响^[1, 2]; 另一方面由于锚桩反力法加载周期短, 不需要额外的荷重作为反力装置, 试验费用较堆载法低; 因而在大吨位桩基静载试验中锚桩反力法应用较为普遍。

对于锚桩反力试桩法而言, 试验过程中试桩受垂直向下的竖向荷载作用, 锚桩则受垂直向上的上拔荷载作用, 试桩和各锚桩之间通过桩周土体产生复杂的相互作用。当试桩和锚桩之间的间距小于一

定数值时, 其相互之间的影响不能忽略, 试验得出的单桩极限承载力值必然和单桩实际极限承载力值存在一定的差异。本文对试桩和各锚桩之间的相互作用进行了分析, 采用 Poulos 弹性理论法考虑锚桩上拔量对试桩 $p-s$ 曲线影响。在此基础上, 利用该方法对某工程实测资料进行了分析, 为该工程提供了更加合理的单桩极限承载力值。

2 试桩和锚桩相互作用分析

2.1 试桩和锚桩相互作用机理分析

图 1 为典型锚桩反力试桩法试验装置平面示意图。由试桩和锚桩通过主梁、副梁组成一个整体的加载体系。试验时, 通过千斤顶给试桩施加垂直向下的竖向荷载, 同时, 通过主梁和副梁给各锚桩施加垂直向上的荷载; 试桩所受向下的竖向荷载等于各锚桩所受垂直向上的荷载之和。随着试验的进行, 试桩所受荷载逐渐地增大, 试桩的沉降量不断地上

升;各锚桩所受上拔荷载也相应增大,上拔变形量也逐渐地增加。当荷载加到试验极限荷载值或试桩发生破坏,或锚桩达到极限抗拔承载力时,试验终止。试验过程中同时记录试桩的沉降量和各锚桩的上拔变形量。

众所周知,桩基受垂直向下的竖向荷载作用时,桩顶竖向荷载由桩侧摩阻力和桩端端阻力承担。当荷载较小时,桩端处尚未发生位移,此时桩顶荷载由桩侧摩阻力承担。当桩顶荷载增加到一定值时,桩端发生位移,桩端开始承受荷载。桩身受荷向下位移时,由于桩土间的摩阻力作用,带动桩周土位移,同时在桩周环形土体中产生剪应力和剪应变。该剪应力和剪应变沿径向向外扩散,在离桩轴 nd ($n = (8 \sim 15)$, d 为桩径) 处剪应变减少到 0^[3]。文[4]指出,桩受上拔荷载时通过桩身将荷载传递到土上的规律类似于受压时,但是所有的应力正负号则与之相反,桩侧摩阻力的方向也相反。桩身拉应力开始产生于桩的顶部,随着桩顶向上位移的增加,桩身拉应力逐渐向下扩展。

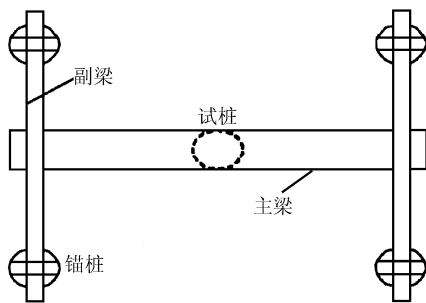


图1 锚桩法试验装置平面示意图
Fig.1 Sketch map of anchor-pile loading test

由于试验条件的限制,试验装置的尺寸不可能很大,主梁和副梁的长度均有一定的限度。当试桩和锚桩的间距小于一定值时,其各自桩周土体的剪应力和剪应变相互耦合。图2为一定荷载作用下试桩和锚桩桩顶周围地面变形示意图。从图中可以看出,试桩和锚桩桩周土体的变形相互叠加,相互影响。随着荷载值的增大,试桩和锚桩的相互作用也越来越强。由于试桩和锚桩的桩侧摩阻力均向桩周土体扩散,表现形式为桩周土体出现一定数值的剪应力和剪应变。由于试桩和锚桩之间的相互作用,导致试桩和锚桩桩周土体各自的应力场和位移场发生变化,必然对试桩和锚桩的承载能力和工作性状产生影响。试验过程中记录的试桩的沉降量和各锚桩的上拔变形量就是试桩和锚桩相互作用的结果。如何处理试验中测出的 $p-s$ 曲线,从中去除试桩和

锚桩相互作用造成的影响,得出试桩实际极限承载力,是一个值得研究的课题。

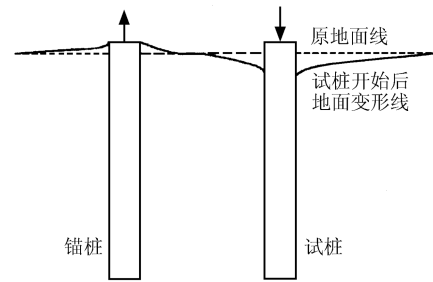


图2 试桩和锚桩桩顶变形平面示意图
Fig.2 Sketch map of deformations of anchor-piles and loading pile

2.2 试桩和锚桩相互作用分析

目前能够考虑桩基之间相互作用的方法主要有:荷载传递法、弹性理论法、有限元法以及各种经验方法等。其中 Poulos 等提出的弹性理论法^[5]由于原理简单,应用方便,大多数情况下能够反映桩基础在工作情况下的性状,已发展成为桩基相互作用分析领域的一种重要理论方法。这种方法把土体视为线弹性体,以弹性连续介质理论模拟桩周土体的响应,利用轴向荷载下桩的变形求得桩的位移,使用半无限体内施加荷载的 Mindlin 方程求解土体的位移,再利用桩土界面位移相等求解。

2.2.1 试桩和单根锚桩两桩相互作用分析

一般来说,由于试桩和锚桩相距很近,其几何尺寸和地质条件相差很小,可视为完全相同。

考虑由几何尺寸完全相同的两根桩组成的群桩,如图3所示。将每根桩划分成 n 个圆柱单元和一个均匀受载的圆底面。假定土体内保持弹性且桩土界面不发生滑移,每一个单元中心处桩与土底位移相等。试桩和锚桩的位移方程与单桩时相同,可用下式表示^[5]:

$$\{\tau\} = \frac{d}{4\delta^2} E_p R_A [I_p] \{S''\} + \{Y\} \quad (1)$$

式中 $\{\tau\}$ 为桩周 $n+1$ 阶剪应力矢量; $\{S''\}$ 为 $n+1$ 阶桩位移矢量; d 为桩径; E_p 为桩身弹性模量; δ 为桩单元长度; $\delta = L/n$, L 为桩长; R_A 为面积比, $R_A = 4A_p / (\pi d^2)$, A_p 为桩截面积,对于实心桩, $R_A = 1$; $[I_p]$ 为桩作用矩阵; $\{Y\}$ 为附加矩阵,二者表达式参见文[5]。

采用锚桩法试桩时桩基长度较长,为摩擦桩型,只有这样锚桩才能提供足够的反力。对于摩擦桩、试桩和锚桩桩侧土的位移方程分别可写为

$$\left\{ \begin{aligned} \{S'_0\} &= \frac{d}{E_s} [I^0] \{\tau_0\} + \frac{d}{E_s} [I^{m0}] \{\tau_m\}; \\ \{S'_m\} &= \frac{d}{E_s} [I^m] \{\tau_m\} + \frac{d}{E_s} [I^{0m}] \{\tau_0\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\{S'_0\}$ 和 $\{S'_m\}$ 分别为试桩和锚桩桩侧土位移矢量; $\{\tau_0\}$ 和 $\{\tau_m\}$ 分别为试桩和锚桩桩侧剪应力和桩端应力矢量; $[I^0]$ 和 $[I^{m0}]$ 为试桩和锚桩对试桩桩侧土位移的 $n+1$ 影响系数矩阵, 其系数 I_{ij}^0 和 I_{ij}^{m0} 分别为试桩和锚桩上单元 j 上的单位剪应力对试桩上单元 i 产生的位移系数; $[I^m]$ 和 $[I^{0m}]$ 分别为桩和试桩对锚桩桩侧土位移的 $n+1$ 影响系数矩阵, 其系数分别 I_{ij}^m 和 I_{ij}^{0m} 分别为试桩和锚桩上单元 j 上的单位剪应力对锚桩上单元 i 产生的位移系数; E_s 为土体的弹性模量。 I_{ij}^0 , I_{ij}^{m0} , I_{ij}^m 和 I_{ij}^{0m} 通过半无限体内竖向荷载所产生的竖向位移的 Mindlin 方程积分得到^[5]。

求解上述试桩桩位移与试桩桩侧土位移相等和锚桩桩位移与锚桩桩侧土位移相等的而建立的方程组, 可以得到试桩和锚桩沿桩身的剪应力和位移的数值。显然, 由于试桩和锚桩所受荷载方向相反, 其桩侧剪应力的方向也相反。

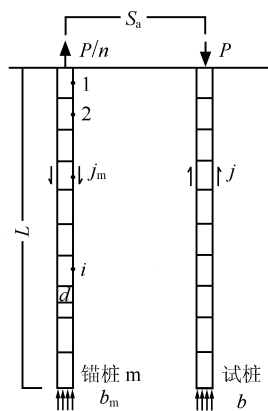


图 3 试桩和单根锚桩相互作用示意图

Fig.3 Sketch map of model on the interaction between an anchor-pile and loading pile

2.2.2 试桩和多根锚桩相互作用分析

对于试桩和多根锚桩组成的群桩而言, 其相互作用分析与两根桩群相同, 只是土位移矩阵中包含了其它几根锚桩的作用。若定义相互作用系数 β 为

$$\beta = \frac{\text{临近桩单位荷载作用下引起的附加竖向位移}}{\text{桩自身在单位荷载作用下的竖向位移}} \quad (3)$$

则可望利用叠加原理和对称性, 方便地将两桩群的分析推广到任一桩数的群桩分析。对于锚桩和试

桩相互作用而言, β 为负; 而对于各锚桩而言, β 为正。显然, 当两桩之间的间距 (S_a/d) 增大时, 相互作用系数 β 减小; 当桩长径比 (L/d) 增大时, 相互作用系数 β 则趋于增大。相互作用系数 β 的大小按前述的方法进行计算。

对于试桩和 n 根锚桩组成的群桩, 试桩的沉降和锚桩的竖向位移分别用以下两式表示:

$$S'_0 = S_0 P + S_m \sum_{i=1}^n \beta_i P_i; S'_{mi} = \beta_i P + S_m \sum_{j=1}^n \beta_{ij} P_j \quad (4)$$

式中 S'_0 和 S'_{mi} 分别为试桩的沉降和第 i 根锚桩的竖向位移; S_0 和 S_m 分别为单位荷载作用下试桩的沉降和第 i 根锚桩的竖向位移; P , P_i , P_j 分别为试桩所受的荷载和第 i, j 根锚桩所受的上拔荷载; β_i 为试桩和第 i 根锚桩之间的相互作用系数; β_{ij} 为第 i 根锚桩和第 j 根锚桩之间的相互作用系数, 当 $i=j$ 时, $\beta_{ij}=1$ 。

3 锚桩法测试数据误差分析

3.1 误差分析机理

试验过程中记录的试桩的沉降量和各锚桩的上拔变形量是试桩和锚桩相互作用的结果。也就是说, 试验中记录的试桩的沉降量和各锚桩的上拔变形量可以视为式(4)左侧计算的结果。当试桩和各锚桩的几何条件和桩周土的地质条件确定时, 试桩和各锚桩之间的相互作用系数、第 i 根锚桩和第 j 根锚桩之间的相互作用系数, 均可通过上述相互作用理论计算出来。将各级荷载下的测试数据和各相互作用系数, 代入式(4), 即可求出每级荷载下的试桩的真正位移值 s ($S_0 P$)。绘出 $p-s$ 曲线, 根据该曲线即可得出试桩无相互作用影响下的承载力。

3.2 工程实例分析

位于浙江省永嘉县的楠江大厦, 主楼 30 层, 框筒结构, 建筑面积为 35 万 m^2 。场区地貌单元为海湾河口相沉积平原。根据勘察结果, 地基土在勘察深度内可划分为 7 个工程地质层, 其工程性质指标见表 1。

表 1 各土层工程性质指标简表
Table 1 The characteristic values of soils

土层名称	厚度 /m	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	直剪固快 c/kPa	直剪固快 $\phi/(\circ)$	标贯击数 $N_{63.5}$	压缩模量 E_s/MPa
①淤泥质粘土	1.0	16.6	16.0	9.6		2.1
②淤泥	8.0	15.6	12.0	9.4		1.6
③中砂	4.5	17.2			8	8.0
④淤泥	11.5	16.1	21.0	10.9		2.3
⑤细砂夹粘性土	3.0	17.5			11	7.5
⑥淤泥质粘土	11.0	16.6	23.0	12.5		2.8
⑦卵石	>25.0	18.0			17	16.0

基础设计采用钻孔灌注桩, 桩径为 $\phi 1\,000\text{ mm}$, 桩身有效长度为 40 m , 桩身混凝土强度等级为 C25, 设计单桩承载力标准值为 $2\,700\text{ kN}$ 。根据设计要求, 共进行锚桩法单桩静载荷试验 3 根, 试验极限荷载为 $4\,450\text{ kN}$ 。图 4 为 1[#]和 3[#]试桩及相应锚桩方位示意图, 2[#]试桩周围的锚桩布置同 1[#]试桩。

根据前述的相互作用理论, 对该工程 3 根试桩的测试数据进行了分析。图 5 为各试桩及相应锚桩试验 p - s 曲线及进行相互作用修正后 p - s 曲线图。由于各锚桩和相应试桩处于几何对称状态, 图中锚桩的上拔变形量为平均值。从图中可以看出, 由于试桩和锚桩的相互作用, 使试桩试验记录的沉降量小于其真实的沉降量, 从而使试验得出的试桩极限承载力偏于危险。1[#]试桩加至试验极限荷载 $4\,450\text{ kN}$ 时, 试桩试验记录的沉降量小于 40 mm , 根据建筑桩基技术规范 (JGJ 94-94) [6] 的规定, 其试验极限承载力值大于等于试验极限荷载 $4\,450\text{ kN}$; 经过相互作用校正后, 试桩下沉量大于 40 mm , 当取对应于 40 mm 变形量的荷载值为试桩极限承载力时, 1[#]试桩校正后的试验极限承载力小于 $4\,450\text{ kN}$ 。虽然 2[#], 3[#]试桩的校正后的试桩下沉量小于 40 mm , 但试验记录的沉降量小于其真实的沉降量, 一定程度上高估了试桩的安全度。

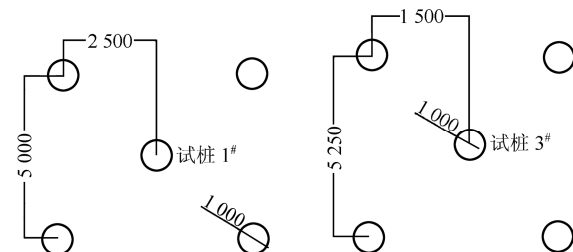


图 4 1[#], 3[#]试桩及相应锚桩方位示意图 (单位: mm)
Fig.4 Sketch map of locations of the anchor-piles and the loading piles #1 and #3 (unit: mm)

4 结 语

本文利用 Poulos 弹性理论法, 对锚桩法单桩静载承载力试验中试桩和锚桩之间的相互作用进行了研究, 提出了考虑锚桩上拔量对试桩 p - s 曲线影响的方法。在此基础上对某工程的 3 根试桩的测试数据进行了分析, 发现采用原始测试数据分析所得出的试桩极限承载力偏于危险, 一定程度上高估了试桩的安全度。采用本文建议的方法能够简单地分析锚桩和试桩相互作用的影响, 并为工程提供了安全可靠试桩极限承载力值。

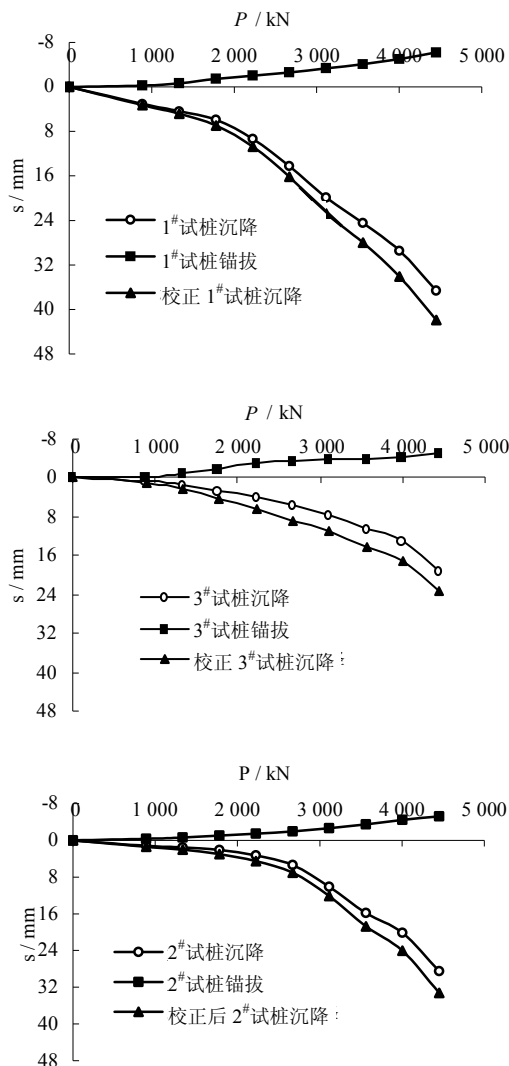


图 5 1[#], 2[#]和 3[#]试桩及相应锚桩试验曲线及校正后图 p - s 曲线 (单位: mm)
Fig.5 The original and adjusted p - s curves of the anchor-piles and loading piles: #1, #2 and #3 (unit: mm)

参 考 文 献

- [1] 袁从华, 章光. 大吨位堆载法对单桩承载力试验的影响[J]. 岩土力学, 1997, 18(1): 78—83.
YUAN Cong-hua, ZHANG Guang. Analyses of effects of high-tonnage piling-up weighs method on static load test for bearing capacity of a single pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1997, 18(1): 78—83.
- [2] 郭启军, 刘泉声, 丁多文等. 堆载法试验对单桩极限承载力的影响研究[A]. 高层建筑基础工程技术[C]. 武汉: 科学出版社, 1995.
- [3] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [4] 刘祖德. 抗拔桩基础[A]. 桩基工程技术[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [5] Poulos H G, Davis E H. *Pile Foundations Analysis and Design*[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980. 71—142.
- [6] JGJ94—94, 建筑桩基技术规范[S].