

桥梁工程中 LDBPs 的群桩工作特性

朱宜生, 杜广印

(东南大学交通学院, 210096, 南京)

[摘要] 将杆系结构有限单元法与荷载传递迭代法相耦合, 形成一桩基沉降分析计算的混合法. 采用近似解析解中 Randolph and Worth' Model 和双曲线模型相结合, 模拟桩身与桩周介质边界上剪切滑移. 桩间相互作用, 采用弹性理论 Mindlin 方程解答计算, 并考虑了桩间“加筋与遮帘”作用. 编制了群桩沉降分析计算程序 GPSA1. 通过计算分析, 对刚性承台下群桩桩数、桩长、桩间距和桩土模量比等群桩工作特性的影响进行了系统研究. 该方法和成果, 可以作为今后群桩沉降分析研究的参考.

[关键词] 群桩相互作用, 刚性承台下群桩, 群桩沉降

[中图分类号] U443.154, **[文献标识码]** A, **[文章编号]** 1672-1292(2002)04-0052-06

1 群桩沉降分析计算的混合法

采用一维拉压杆单元(rod element)近似模拟桩身的结构特征, 对桩身和桩周介质边界进行离散处理, 根据荷载传递迭代法的基本原理, 在桩身节点处, 引入弹簧模拟桩身与桩周介质边界上复杂性质, 形成单桩沉降计算简化模型, 见图 1. 在此基础上, 根据弹性理论 Mindlin 方程解答, 计算群桩桩间相互作用的竖向位移影响系数^[1].

桩身与桩周接触面上弹簧, 采用 Randolph and Worth' Model^[2,3]表示其剪切滑移 $\tau_0 \sim w$ 关系, 见表达式(1)~(3):

$$w = \frac{\tau_0 r_0}{G} \int_{r_0}^{\infty} \frac{1}{r_0} = \frac{\tau_0 r_0}{G} \xi \quad (1)$$

$$\text{其中 } \xi = \ln(r_m/r_0) \quad (2)$$

$$r_m = A \frac{1 - \nu_s}{1 + n} L + B r_0 \quad (3)$$

式中: τ_0 为桩身与桩周介质边界上的剪切应力; ν_s 为桩周介质的泊松比; L 为桩身长度; n 为桩周介质剪切模量随深度 z 增长的指数模型中参数, 其含义参见表达式(7); B 为模型参数, 一般情况可按 $B = 5.0$ 取值; r_m 、 r_0 分别为桩的影响半径和桩身截面半径; A 为模型参数, A 的确定相对比较复杂, 可参阅文献[3,4].

考虑到群桩中相邻桩对 r_m 影响半径的影响, Randolph and Worth 1978 年又提出了“群桩”的影响半径的概念^[5], 并就两相邻桩情况, 建议采用下式计算 (Lee, 1991; Guo and Randolph, 1999):

$$r_{mg} = r_m + \epsilon_g \gamma_g \quad (4)$$

收稿日期: 2002-11-14.

作者简介: 朱宜生, 1958-, 东南大学交通学院讲师, 主要从事岩土工程的教学与研究.

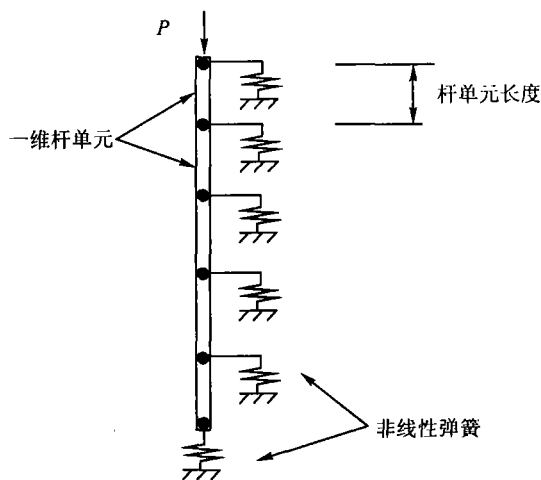


图1 桩身和桩周介质的简化模型

$$\text{其中, } \epsilon_g = 1 - e^{(1-h/L)} \quad (5)$$

$$\gamma_g = (0.3 + 0.2n)s \quad (6)$$

在表达式(4)中,参数 γ_g 一般为相邻桩间距的 1/2 或 1/3,更常见的是采用表达式(6)进行估算,其中参数 s 取桩间距 s 和桩影响半径 r_m 中的小值. 表达式(5)考虑有限压缩层厚度 h 对“群桩”影响半径 r_m 的影响.

采用双曲线模型的切线刚度概念^[6],模拟了边界上剪切滑移的非线性特征,见表达式(7). 将表达式(7)代入表达式(1),可以得到表达式(8).

$$G_t = G_0 \left(1 - \frac{\tau_f R_{fs}}{\tau_f} \right)^2 \quad (7)$$

$$w_n = \frac{\tau_0 r_0}{G_0} \left(\ln \left(\frac{r_m - \Omega}{r_0 - \Omega} \right) + \frac{\Omega(r_m - r_0)}{(r_m - \Omega)(r_0 - \Omega)} \right) \quad (8)$$

$$\text{其中 } \Omega = \frac{\tau_0}{\tau_f} \gamma_0 R_{fs}$$

桩周介质的非均质性特征,采用了指数函数模拟其剪切模量 G 随深度 z 的复杂关系^[4],即

$$G = A_g (\alpha_g + z)^n \quad (9)$$

式中, A_g 、 α_g 和 n 均是计算常数,各自的物理含义是十分清楚的,不赘述.

此外,基于 Randolph and Worth' Model,作者推导了群桩桩身的“加筋与遮帘”作用定量计算表达式,采用群桩“加筋与遮帘”系数 λ_r ,即

$$w = (1 - \lambda_r) \frac{\tau_0 r_0}{G} \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right) \quad (10)$$

$$\text{其中 } \lambda_r = \frac{r_0}{2s} \left[1 - \frac{\ln \left(\frac{s}{r_0} \right)}{\ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right)} \right] \quad (11)$$

修正“加筋与遮帘”作用对群桩沉降的影响.

根据上述,笔者编制了群桩沉降分析计算程序 GPSAI,并根据这一程序对群桩工作特性进行了系统的分析.

2 群桩沉降计算与分析

2.1 刚性承台下群桩桩数 n 对群桩沉降的影响

在程序 GPSAI 中,采用有限单元中“大弹簧”技术,对群桩桩顶进行等沉降约束处理,实现了对刚性承台下群桩工作特性的模拟. 针对刚性承台下群桩工作机制的研究,引入两个概念,一是刚性承台下群桩桩数为 n 的平均荷载 P_a 概念,定义为

$$P_a = \frac{\text{承台总荷载}}{n} \quad (10)$$

二是刚性承台下群桩平面分布中,某根桩 i 分担荷载为 P_i ,其所对应的承载比 R_i ,可以定义为

$$R_i = \frac{P_i}{P_a} \quad (11)$$

根据桥梁工程中 LDBPs 课题^[1]的研究成果,选择课题中“锡澄

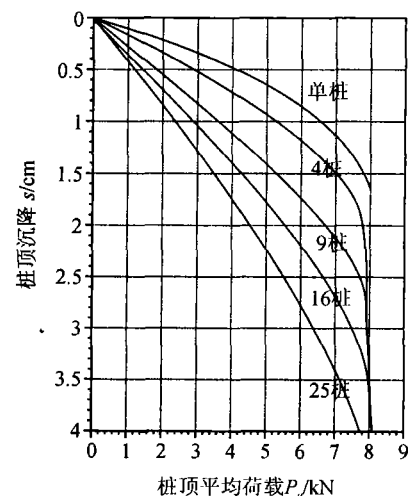


图2 群桩桩数 n 对群桩沉降的影响

运河”场址,该场址基岩上沉积物以饱和(相对较软的)粘性土为主,土层泊松比取 $\nu = 0.5$. 选用了刚性承台下4桩、9桩(3排)、16桩(4排)和25桩(5排),桩间距均为 $s = 4d$. 就群桩桩数 n 对沉降影响进行了分析,计算结果见图2.

通过图2的分析可以看出,首先,群桩中桩数 n 的变化,对群桩中一根桩的极限承载力几乎没有影响;其次,对于相同的群桩平均荷载 P_a ,随着桩数 n 的增加,沉降将明显增加. 由此可以看出,群桩基础中的功能性准则相对单桩基础更加重要,且随着桩数 n 的增加,沉降(变形)分析将必然取代承载力(强度)分析,用于控制群桩基础的设计.

刚性承台下群桩中的某一根桩,在平面布置上位置的不同,该桩在(承台)加载过程中所承担的桩顶荷载水平不尽相同. 群桩中某根桩的承载比 R_i 与群桩桩数 n 、平面布置(位置)和群桩荷载水平相关. 同样以“锡澄运河”刚性承台下9桩为例,计算结果见表1. 在加载初始状态,9根桩承载比的平面分布见图3.

表1 9桩刚性承台的各桩承载比 R_i

沉降 s/mm	桩 号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
初始(1)*	1.18	0.93	1.18	0.93	0.64	0.93	1.18	0.93	1.18
10	1.11	0.96	1.11	0.96	0.75	0.96	1.11	0.96	1.11
20	1.05	0.98	1.05	0.98	0.88	0.98	1.05	0.98	1.05
30	1.00	0.999	0.999	0.999	0.999	1.00	1.00	0.999	1.00

*注:括弧(1)中的数字“1”表示桩顶沉降为 $s = 1\text{ mm}$,并视为群桩的初始状态.

将对应一个小的桩顶沉降,例如本文中的 1 mm ,视为桩基础的初始状态. 则随着承台荷载的增加,群桩中各桩承载比 R_i 将由初始状态的差异性较大,逐渐趋于均匀. 这一特征是由于桩身与桩周介质边界上剪切滑移非线性和边界上存在荷载传递量的临界值(完全塑性特征)的缘故. 换言之,如果这一关系假定为线弹性,则随着荷载水平的上升,各桩的 R_i 将保持不变. 有学者则认为,群桩工作荷载作用下,应力水平相对较低,采用线弹性模型的方法是可行的. 显然这一假定相对比较粗糙. 图3清楚地表明,对应初始状态,刚性承台下群桩中部的桩所承担的荷载最小,而外边缘的角桩所承担的荷载量大.

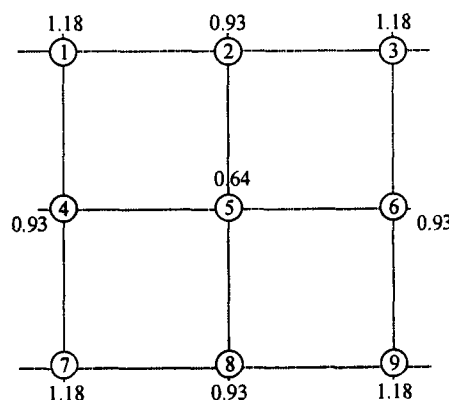


图3 群桩承载比 R_i 的分布规律

此外,随着刚性承台下桩数 n 的增加,各桩承载比 R_i 的差异性明显增加,见表2. 表2中群桩临界位移 s_u 的概念是指,首先出现各桩均匀承担外荷载,即 $R_i = 1.0 (i = 1, 2, \dots, n)$ 时,所对应承台位移. 随着桩顶平均荷载水平的提高,刚性承台下各桩的承载比 R_i 的差异性逐渐减小,直至临界状态(或对应承台沉降为 s_u)时,呈均匀承担外荷载状态. 随着桩数 n 增加,承台临界位移 s_u 亦相应增大,即刚性承台达到其极限承载力状态时,所需位移在不断加大.

可以得到与图2相同的结论,即随着桩数 n 增加,刚性承台(桩基础)的功能性稳定验算,将变得更加的重要,桩基础的变形稳定验算将逐渐取代桩基础强度验算,成为控制桩基础设计的主要因素.

表 2 刚性承台下不同桩数承载比 R_i

桩数	沉降	初始状态(1)*		10		20		临界位移 s_u
		最大	最小	最大	最小	最大	最小	
4		1.10	0.90	1.03	0.97	1.00	1.00	20
9		1.18	0.64	1.11	0.75	1.05	0.88	27
16		1.39	0.60	1.30	0.66	1.17	0.78	36
25		1.60	0.47	1.50	0.49	1.35	0.54	>40

*注:括弧(1)中的数字“1”表示桩顶沉降为 $s = 1$ mm.2.2 桩间距 s 和桩长 L 对群桩的影响

同样以“锡澄运河”场址, LDBPs 的 9 桩承台为例. 不同桩间距 s 对群桩桩顶平均承载力 P_a 的影响, 见图 4. 不同桩间距 s 对群桩承载比 R_i 的影响, 见表 3.

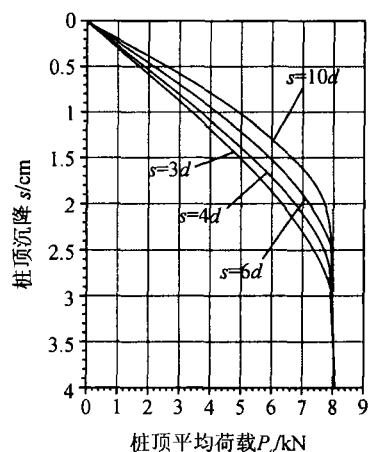
表 3 刚性承台下不同桩间距承载比 R_i

间距	沉降	初始状态(1)*		10		20		临界位移 s_u
		最大	最小	最大	最小	最大	最小	
$3d$		1.19	0.60	1.13	0.71	1.06	0.86	30
$4d$		1.18	0.64	1.11	0.75	1.05	0.88	27
$6d$		1.15	0.69	1.08	0.80	1.02	0.92	26
$10d$		1.12	0.75	1.05	0.88	1.01	0.98	22

*注:括弧(1)中的数字“1”表示桩顶沉降为 $s = 1$ mm.

图 4 可以看出, 随着桩间距 s 的增加, 群桩极限承载力基本不变; 但是, 对应同等平均荷载 P_a , 桩顶沉降 s 不断降低. 也即刚性台下群桩桩间距 s 愈大, 桩台基础沉降变形愈小, 变形稳定性愈好. 表 3 中表明, 间距 s 愈小, 各桩的承载比 R_i 的差异愈大, 初始状态各桩分担荷载愈不均匀, 且对应临界位移 s_u 相对愈大, 反之亦然.

同上, 采用 9 桩(3 排) 刚性承台作为分析对象, 桩间距 $s = 4d$, 桩径 $d = 100$ mm. 刚性承台下群桩桩长 L 分别取 10 m、20 m、40 m 和 80 m, 不同桩长 L 对群桩平均荷载 P_a 的影响, 见图 5. 不同桩长 L 对群桩中承载比 R_i 的影响, 见表 4.

图 4 不同桩间距 s 对群桩平均承载力 P_a 的影响表 4 刚性承台下不同桩长 L 对承载比 R_i 影响

桩长/m	沉降/mm	初始状态(1)*		10		20		临界位移 s_u
		最大	最小	最大	最小	最大	最小	
10		1.20	0.57	1.01	0.97	1.00	1.00	12
15		1.25	0.48	1.05	0.86	1.00	1.00	15
20		1.25	0.48	1.08	0.76	1.00	1.00	18
25		1.24	0.51	1.10	0.72	1.00	1.00	20
40		1.19	0.63	1.11	0.74	1.04	0.89	28
80		1.12	0.75	1.08	0.82	1.03	0.93	>40

*注:括弧(1)中的数字“1”表示桩顶沉降为 $s = 1$ mm.

通过分析可以看出, 当桩长为 20~25 m, 群桩中承载比 R_i 的差异性, 随桩长 L 而增大. 当桩长 $L > 25$ m 后, 继续增大桩长, 群桩承载比的差异性降低. 如果桩基础容许沉降控制在 10 mm 以内, 则桩长变化即使是由 40 m 增加到 80 m, 对刚性承台的(工作状态)承载力的贡献亦相对十分的有限, 这与柔性桩

中,存在有效桩长概念相吻合.因此,只有结构设计容许桩基础的变形相对较大时,采用加大桩长 L 的方法提高桩基承载力才能有效.换言之,群桩中深长桩的承载力充分发挥,需要相对较大的容许(群桩)桩基础沉降.

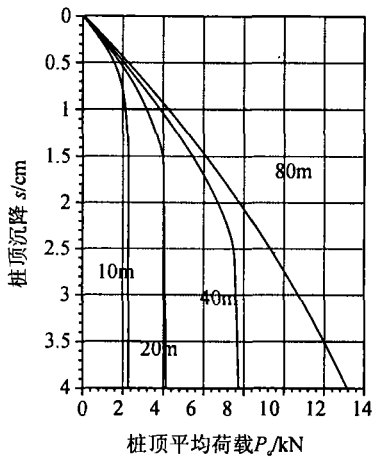


图5 桩长对群桩平均承载力的影响

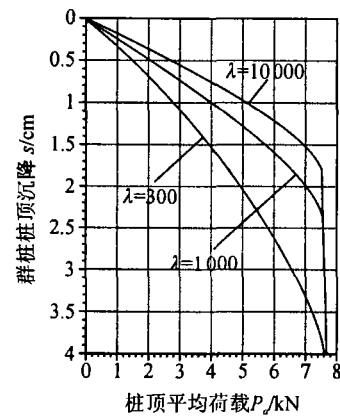


图6 不同桩土模量比 λ 对群桩沉降的影响

2.3 桩周介质剪切模量 G 与桩身弹性模量 E_p

采用典型的三种桩土模量比,即 $\lambda = 300$ 、 $\lambda = 1\,000$ 和 $\lambda = 10\,000$,并且桩长为 $L = 40\text{ m}$ 、桩径 $d = 100\text{ cm}$ 和桩间距 $s = 4d$,仍为9桩刚性承台基础.对应上述不同的3种桩土模量比 λ ,刚性承台下群桩沉降分析计算的结果,参见图6和表5.

通过对计算结果的分析,不难看出,桩土模量比 λ 的提高,对减少群桩的沉降十分有利.当模量比 $\lambda > 1\,000$ 时,再提高 λ ,即通过提高桩身材料模量减小群桩沉降的作用相对逐步减弱.随着桩土模量比 λ 的增加,对应初始状态,群桩中承载比 R_i 的差异性增大,但群桩中各桩承载比 R_i 随着荷载水平增加的均匀变化过程却在加快.也即桩土模量比 λ 愈大,初始状态下各桩分担荷载愈不均匀,但是随着群桩荷载水平的提高,各桩逐渐过渡到均匀分担状态的过程加快.这对于在一定容许沉降变形的条件下,群桩基础的承载力发挥十分有利.

表5 桩土模量比 λ 与群桩承载比 R_i 的关系

模量比 λ	初始状态(2)*		10		20		临界位移 s_u
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	
300	1.07	0.82	1.03	0.92	1.01	0.96	38
1000	1.11	0.75	1.05	0.85	1.01	0.95	26
10000	1.18	0.57	1.09	0.75	1.00	0.99	20

*注:括弧(2)中的数字“2”表示桩顶沉降为 $s = 2\text{ mm}$.

3 结束语

根据本文群桩沉降的计算分析,采用群桩桩顶位移相等约束处理方法,模拟刚性承台下群桩的工作特性是成功的.通过分析,可以得出如下结论:

(1) 单桩桩顶作用荷载与群桩平均荷载 P_s 相同的条件下,群桩由于桩间的相互作用,而使得刚性承台下的群桩的沉降显著高于相应的单桩沉降.

(2) 随着群桩桩数 n 的增加,对应同等平均荷载水平 P_s ,群桩沉降相应增加;并且群桩中初始状态对应各桩承载比 R_i 的差异性加大.因此,群桩基础的功能性准则验算相对单桩将更加重要.一般刚性承台下群桩承载比的分布规律是,群桩平面分布中心位置的桩承担荷载相对最小,而最外侧的角桩承担荷

载最大。

(3) 群桩桩间距 s 的增加,群桩间的相互作用必然减弱,群桩的承载力变形特征逐渐向单桩的规律接近,且这一作用十分的明显。因此,保证一定的桩间距 s ,对群桩沉降和(工作状态)承载力发挥,一桩基础的变形稳定均十分有利。这对于桩数 n 较多的群桩基础更加重要。

(4) 桩长 L 对减小群桩沉降变形的影响,与桩基的容许变形相关,这一概念十分重要。9 桩刚性承台的算例中,桩长超过 40 m 后,增加桩长对群桩变形影响已相对减弱,甚至对应桩基容许变形为 10 mm 时,可以忽略。因此,当上部结构对基础沉降变形要求较高的场合,以增加桩长来提高群桩变形稳定性,或承载力,有时不尽合理。

(5) 桩身模量与桩周介质的剪切模量之比 λ ,对群桩基础沉降有影响。算例分析表明, λ 值在相对较低(< 1000)水平时, λ 增加对群桩沉降减小十分有效。但是,当 λ 值较高(> 1000)时,这一作用相对明显降低。因此,桩周介质的剪切模量较高时,提高桩身刚度,才能更有效地达到提高群桩基础承载力,改善其变形稳定性之目的。反之,则作用可能不大。

[参考文献]

- [1] H G Poulos, E H Davis. Pile foundation analysis and design[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [2] M F Randolph, C P Worth. Analysis of deformation of vertically load piles[J]. J Geotech Enghg Div, 1978, ASCE 104 (12):1465~1488.
- [3] W D Guo, M F Randolph. An efficient approach for settlement of piles groups[J]. Geotechnique, 1999, 49(2):161~179.
- [4] W D Guo. Vertically loaded single piles in Gibson Soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(2):189~193.
- [5] M F Randolph, C P Worth. An analysis of vertical deformation of pile groups[J]. Geotechnique, 1979, 29(4):157~166.
- [6] Y K Chow. Analysis of vertically loaded pile groups[J]. Int J for Numerical and analytical mechanics, 1986, 10(1):59~72.

Some Behaviors of Pile Group for LDBPs in Bridge Engineering

Zhu Yisheng, Du Guangyin

(Traffic Institute of Southeast University, 210096, Nanjing, PRC)

Abstract: One hybrid method of finite element analysis of rod structure coupling with load transfer approach for piles groups settlement was established. The behavior of shear-displacement on the boundary between pile and ground was determined by the Randolph and Worth' Model in the approached closed form solution, coupling with the hyperbolic model. The action of pile groups was evaluated from the Mindlin equation solution, and adjusted by the "restraint" action approximately. The program GPSAL relevant to that narrated above for predicting settlement of piles groups had been written triumphantly. The influences of number of piles, the pile length, the space between piles, and the pile-soil relative stiffness factor on the characteristic of pile groups were analyzed in a systematic way. The documentation gives guidance for future research in the analysis of piles groups settlement.

Key words: interaction of pile group, piles with rigid cap, settlement of pile group

[责任编辑:严海琳]