

群桩基础沉降计算的近似混合法^{*}

沈苾文¹, 张英¹, 毛江才², 李靖³

(1 浙江水利水电专科学校, 浙江 杭州, 310016; 2 桐庐市政建设管理处, 浙江 桐庐 311500;

3 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100)

[摘 要] 基于混合法的基本思想, 提出了用于群桩沉降非线性计算的近似混合法。近似混合法通过构造单桩沉降荷载曲线的插值函数以及采用相互作用系数考虑群桩之间的弹性影响, 避免了因各桩离散成许多单元而导致土体柔度矩阵 $[\delta]$ 集成的费时, 从而可进行多桩数群桩的非线性计算而不受微机内存和运算速度的限制。算例证明, 本法与混合法的计算结果非常吻合。

[关键词] 群桩; 基础沉降; 沉降计算; 混合法

[中图分类号] TU 473 1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2003)06-0158-03

有限元法和混合法是群桩非线性沉降分析的主要方法。有限元法是精确的数值算法, 但因计算参数多, 对计算机内存和运算速度要求较高, 目前还难以直接用于实际工程。混合法用荷载传递函数法计算单桩沉降, 用Mindlin解考虑群桩之间的相互影响, 能较好地考虑土的成层性和非线性性状以及桩-土-承台的相互作用, 成为目前最常用的群桩沉降非线性计算方法, 但该方法面临的最大问题是, 用Mindlin解分析群桩相互作用时, 各桩与承台每一单元的相互作用都要积分计算, 因而当桩数增多时, 会出现微机内存不足以及运行时间较长等缺点。国内王旭东等^[1,2]对混合法作了较多的探索, 提出了修正的理论荷载传递函数, 并采用有限层元法考虑桩-土-承台的相互作用, 提高了混合法对成层土中群桩沉降预测的精度, 且不受微机内存的限制, 但当桩数增多时, 有限层元法计算所需的边界域增大, 计算运行时间随之成倍增加。本研究采用混合法的基本思想, 提出一种近似的数值求解方法, 以期是多桩数的群桩沉降非线性计算提供参考。

1 混合法

1.1 混合法的基本原理

Chow^[3]指出, 桩在承受轴向荷载时, 桩周土体只在附近的近场高应变区产生非线性位移; 群桩间的大部分土体均处于应变水平很低的远场范围内, 可以认为只产生弹性反应。这一结论已被很多的试

验观测所证实。这样, 群桩的非线性工作性状就由群桩中每一单桩的非线性工作性状所决定, 而桩间的相互影响基本上保持弹性工作性状。根据这一规律, 混合法用荷载传递函数法模拟群桩中每一单桩的非线性行为, 而用Mindlin解、有限层元法等来考虑桩-土-承台的相互弹性作用。

1.2 群桩沉降的非线性计算

混合法群桩沉降非线性计算的关键是建立桩-土-承台共同作用的基本方程, 该方程建立前, 首先要求每一根桩、承台底以及桩、承台底相接触的土体表面离散成许多单元, 其具体建立过程可参见文献[2]。如果不考虑承台的影响(如高桩承台), 则其基本形式为:

$$([K_p] + [K_s])\{S\} = \{Q\} \quad (1)$$

式中, $[K_p]$ 为桩身总体刚度矩阵; $[K_s]$ 为土体刚度矩阵, 由土体柔度矩阵 $[\delta]$ 求逆得到; $\{S\}$ 为桩身结点位移列向量; $\{Q\}$ 为桩顶荷载向量。采用子结构技术, 从上述方程分离与桩顶结点对应的方程组^[2], 并引入刚性承台条件, 求解方程就可以得到各桩顶沉降。当桩数增加时, $[\delta]$ 的集成相当费时, 以致限制混合法在多桩数群桩中的应用。

2 近似混合法

2.1 荷载传递法计算单桩的S-Q曲线

荷载传递函数法的理论见文献[4]。单桩桩顶竖向荷载 Q 分 m 级加载, 对每一级荷载 Q_i , 用荷载传

* [收稿日期] 2002-11-06

[作者简介] 沈苾文(1974-), 男, 浙江舟山人, 硕士, 讲师, 主要从事基础工程及建筑结构研究。

递函数法计算相应的沉降 S_i ,这样就可以得到 m 组 (Q_i, S_i) 值,用3次样条插值的方法构造 $S-Q$ 曲线的插值函数:

$$S = f(Q) \quad (2)$$

为使插值函数更逼近计算的 $S-Q$ 曲线,可根据实际问题,在 $S-Q$ 曲线曲率较大段多计算几个插值点 (Q_i, S_i) 。

2.2 相互作用系数及群桩间的弹性影响

2.2.1 相互作用系数的插值函数 为避免因各桩离散成许多单元而导致土体柔度矩阵 $[\delta]$ 集成的费时,常采用相互作用系数考虑群桩之间的相互作用。需说明的是,相互作用系数这一概念由Poulos^[5]提出,Poulos最初用以Mindlin位移解为基础的边界元法计算相互作用系数,根据相互作用系数的定义,也可用有限层元法或以Mindlin应力解为基础的变形总和法等来计算相互作用系数,各方法对实际问题的适用性可参见文献[6],本文采用Poulos的边界元法计算相互作用系数 α_{ij} ^[4]:

对于群桩中的任意两根桩 i, j ,其相互作用系数 α_{ij} =第 j 根桩上的单位荷载对第 i 根桩产生的附加沉降量/第 i 根桩上的单位荷载对第 i 根桩所产生的沉降量= $g(\frac{S_a}{d}, \frac{E_p}{E_0}, \frac{L}{d}, \nu_s)$

式中, S_a 为两桩中心之间的距离; E_p 为桩身弹性模量; E_0 为土体的变形模量; $\frac{L}{d}$ 为桩的长径比; ν_s 为土体的泊松比。

当地基土的土性参数及桩的尺寸确定时, $\alpha_{ij}=g(\frac{S_a}{d})$ 。

计算相互作用系数 α_{ij} 时,最理想的情况是根据实际问题中各桩间的距离逐个计算。然而,计算 α_{ij} 较费时,当群桩中包括很多桩时,各桩之间逐个计算显然不切实际。解决此问题的办法是,取 m 个 $\frac{S_a}{d}$ 值,求相应的相互作用系数 α_{ij} ,得到 m 对 $(\frac{S_a}{d}, \alpha_{ij})$ 数值,然后采用一定形式的函数进行拟合,或用多项式进行插值,本文采用样条插值,得到插值函数:

$$\alpha_{ij} = g(\frac{S_a}{d}) \quad (3)$$

当 $\frac{S_a}{d} = 1 \sim 10$ 时, α_{ij} 值变化较剧烈,可适当增加插值点个数^[6],以提高插值函数的精度。

2.2.2 群桩之间的弹性影响 对于由 n 根尺寸相同的桩组成的群桩,假设各桩顶作用的竖向荷载为

Q_j ,单桩在桩顶单位荷载作用下的桩顶沉降量为 S_u (计算相互作用系数的同时得到 S_u),则任意桩 i 因群桩中其他桩影响而引起的沉降量为:

$$\Delta S_i = \sum_{j \neq i}^n S_u Q_j \alpha_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中, α_{ij} 由桩 i 与桩 j 的中心距 S_a 与桩径 d 的比值 $\frac{S_a}{d}$ 决定,可通过式(3)计算。

2.3 群桩沉降的近似混合法计算

根据混合法的基本原理,由 n 根桩组成的群桩中的任一根桩 i ,其沉降量由两部分组成,其一是自身桩顶受荷载 Q_i 的作用引起的沉降 S_i^z ,可由式(2)计算,其值为 $S_i^z = f(Q_i)$;其二是由其他桩影响引起的 ΔS_i ,可由式(4)计算得到,这样桩 i 的总沉降量为

$$S_i = S_i^z + \Delta S_i = f(Q_i) + \sum_{j \neq i}^n S_u Q_j \alpha_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

对于柔性承台或筏基的群桩基础,各桩顶荷载已知,则可由式(5)直接计算各桩顶的沉降。对于刚性承台,承台位移可以用几何中心竖向位移 S_0 以及两个倾斜系数 λ_x, λ_y 来表示。那么,相对于形心坐标为 (x_i, y_i) 的桩 i ,其位移 S_i 还必须满足以下条件:

$$S_i = S_0 + \lambda_y y_i + \lambda_x x_i$$

把式(5)代入上式,得:

$$f(Q_i) + \sum_{j \neq i}^n S_u Q_j \alpha_{ij} = S_0 + \lambda_y y_i + \lambda_x x_i, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

另外,令群桩所受总荷载为 Q ,其偏心距为 e_x 和 e_y ,则由承台的静力平衡可得:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n Q_i &= Q; \sum_{i=1}^n Q_i x_i = Q \cdot e_x; \\ \sum_{i=1}^n Q_i y_i &= Q \cdot e_y \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)和(7)共有 $n+3$ 个方程,有 n 个未知荷载 Q_i 和 S_0, β_x, β_y 共 $n+3$ 个未知量。上述 $n+3$ 个方程组成的方程组为非线性方程组,可用迭代法求解^[6]。

3 近似混合法正确性的验证

混合法求解群桩沉降的可行性已为广大学者所认可,因此,只要用算例验证近似混合法与混合法的计算结果相吻合,就能说明近似混合法的正确可行。作者对混合法和近似混合法都编了程序,并进行了十几个算例的计算,发现两者对同一算例计算结果的差异都在5%之内,非常吻合。

算例 均质土地基中 9 根桩组成的高承台群桩基础, 承台为刚性, 桩径 d 为 0.4 m, 桩长 10 m, 桩间距 $3d = 1.2$ m, 桩身混凝土弹性模量为 2.8×10^7 kPa, 地基土变形模量为 10 MPa, 泊松比为 0.4, 桩侧极限摩阻力为 30 kPa, 极限端阻力为 400 kPa。承台与桩位的布置见图 1。

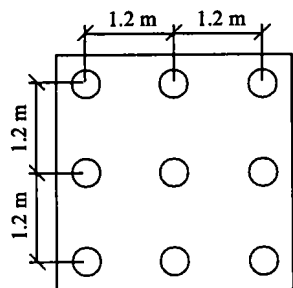


图 1 承台与桩位布置

Fig 1 The distributing of piles and cap

本算例中, 桩侧荷载传递函数采用文献[1]提出的修正理论 t - z 曲线:

$$s = \frac{T_0 r_0}{G_i} \ln \left[\frac{\frac{r_m}{r_0} - \frac{T_0 R_f}{T_i}}{1 - \frac{T_0 R_f}{T_i}} \right] \cdot \exp \left(M_f \frac{T_0}{T_i} \right) \quad (8)$$

桩底荷载传递函数采用:

$$s_b = \frac{P_b (1 - v_b)}{4 G_b r_0 (1 - \frac{P_b R_f}{P_i})} \quad (9)$$

(8), (9) 式中, R_f, R_i 为双曲线拟合常数, 本算例中取 0.9; M_f 为修正系数, 本算例中取 0; 其他符号的意义见文献[1]。

为了更具可比性, 混合法中土体柔度矩阵 $[\delta]$ 的集成, 可通过对 Mindlin 位移解积分得到。相应的, 近似混合法中用以 Mindlin 位移解为基础的边界元法计算相互作用系数。

分级加载竖向中心荷载, 各级荷载下混合法和近似混合法计算的群桩沉降结果以及两者的差异见表 1。由表 1 可知, 近似混合法和混合法的计算结果非常吻合。

表 1 近似混合法和混合法群桩沉降量计算

Table 1 Comparison of results calculated by approximate hybrid approach with those calculated by hybrid approach

荷载/MN Load	沉降量/mm Settlement		$(R_2 - R_1)/R_1$
	R_1	R_2	
1.0	9.57	9.66	0.0094
2.0	19.96	19.60	0.0184
3.0	31.57	31.07	0.0161
3.3	35.78	34.82	0.0261
3.6	41.62	40.20	0.0353

注: R_1 代表混合法计算结果; R_2 代表近似混合法计算结果。

Note: R_1 stands for the results of hybrid approach; R_2 stands for the results of approximate hybrid approach.

4 结 论

1) 提出了近似混合法, 算例证明其计算结果与混合法非常吻合。

2) 近似混合法通过构造单桩的 s - Q 曲线插值函数, 采用相互作用系数考虑群桩之间的弹性影响, 避免了因各桩离散成许多单元而导致土体柔度矩阵 $[\delta]$ 集成的费时, 从而可进行多桩数群桩的非线性计算, 而不受微机内存和运算速度的限制。

3) 本研究提出的近似混合法还不能考虑低承台的作用。

4) 与混合法相同, 近似混合法对沉降的预测精度取决于荷载传递函数及土性参数特别是土的变形模量的正确选取。另外, 与混合法相同, 根据实际问题选择一种能考虑分层土中桩-桩相互弹性影响的有效方法, 将提高分层土中群桩沉降的预测精度。

[参考文献]

- [1] 王旭东, 魏道堃, 宰金珉. 单桩荷载沉降的非线性分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1994, (1): 15-24.
- [2] 王旭东, 魏道堃, 宰金珉. 群桩-土-承台结构共同作用非线性数值分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1994, (4): 1-8.
- [3] Chow Y K. Analysis of vertically loaded pile groups[J]. Int J Number Anal Meth Geomechs, 1986, 10: 59-72.
- [4] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990: 223-241.
- [5]oulos H G. Analysis of the settlement of pile groups[J]. Geotechnique, 1968, 18: 449-471.
- [6] 沈蕊文. 群桩基础沉降计算方法研究——改进混合法的提出及计算程序的编制[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 2000.

(下转第 172 页)

Study on urban solid waste management decision support system

CHEN Li¹, YANG Zhong-ping²

(1 College of Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China;

2 College of Mechanics and Electronic Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Shaanxi, Yangling 712100, China)

Abstract: Regarding urban solid waste management as the main topic, statistics and forecasting, proposal decision, economic analysis, and energy value analysis are concerned. Moreover, a model of Urban Solid Waste Management Decision Support System is built up. Based on the model, the design and implementation of the system are made. In addition, taking garbage composition statistics and forecasting module of statistics and analysis sub-system as an example, the model and algorithm adopted in the module are analyzed and defined.

Key words: city; solid waste; Decision Support System

(上接第 160 页)

Approximate hybrid method for computing the settlement of pile groups

SHEN Bi-wen¹, ZHANG Ying¹, MAO Jiang-cai², LI Jing³

(1 Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou, Zhejiang 310016, China;

2 Tonglu Town Construction Department, Tonglu, Zhejiang, 312000, China;

3 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the principle of hybrid approach, approximate hybrid approach for the prediction of nonlinear settlement of pile groups is presented. It avoids dispersing piles to many elements by constructing interpolating splines of single pile and by using interaction factor to calculate the interaction between piles. It can be applied to piled foundations consisting of lots of piles without the limitation of computer speed and memory capacity. The Results calculated by approximate hybrid approach are more coincided with those calculated by hybrid approach.

Key words: pile groups; foundation settlement; settlement calculation; hybrid method