

文章编号: 1000-7598-(2005) 01-0122-05

深厚软基上多(高)层建筑桩基础的共同作用分析

解家毕, 刘祖德

(中国水利水电科学研究院 防洪减灾研究所, 北京 100038 武汉大学 土木建筑学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 探讨了深厚软弱地基上多(高)层建筑桩基础的共同作用分析方法, 建立了桩土相互作用的界面模型, 采用子结构法考虑上部结构刚度对基础变形和地基沉降的影响, 同时考虑地基为弹塑性的, 并采用无限元法考虑远场区域的影响。通过一个工程实例验证了模型的合理性, 计算结果表明, 计算方法能反应深厚软弱地基上桩基础的沉降特性。

关 键 词: 桩基础; 共同作用; 子结构法; 无限元

中图分类号: TU 473 **文献标识码:** A

Analysis on interaction model of pile foundation and superstructure on thick and soft groundsill

XIE Jia-bi, LIU Zu-de

(China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing, 100038, China School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, 430072, China)

Abstract: This present paper deals with the interaction analysis method of pile foundation established on thick and soft groundsill. A contact interaction model is given to simulate the interaction between pile and soil, soil and base slab. As for the superstructure, it uses substructural method to take its stiffness into account to the settlement of foundation. It regards the soil as elasto-plasticity, and uses infinite element to account for the effect of far field groundsill. In the end, an analysis example is given. From the results, It can be seen that the analysis method adopted in this paper works very well.

Keywords: pile foundation, interaction, substructural method, infinite element

1 前 言

自 20 世纪 80 年代以来, 多(高)层建筑上部结构、基础和地基的共同作用分析越来越多地应用到工程实践中, 对共同作用分析方法的探讨也成为学术界的一个热门课题。同时, 每年有成百上千的高层、超高层建筑正在兴建, 这对常规基础分析方法提出了挑战, 同时也提供了各种素材。共同作用分析方法的发展是与生产的发展、技术的进步、特别是计算手段的突飞猛进密切相关的^[1-6]。

传统的设计方法是将被上部结构隔离开来, 并用固定支座来代替基础, 求得上部结构的变形和支座反力, 但支座是假定为没有变形的; 然后, 把支座反力反作用于基础上, 假定地基反力是线性分布的, 因此, 可以求得基础内力和变形; 再把地基反力作用在地基或桩上来校核地基的强度和变形。实践证明, 上部结构的刚度对基础的内力和变形有着直接

的影响, 基础刚度和地基条件反过来也影响着上部结构。理想情况下可以把上部结构视作绝对刚性或绝对柔性的, 当把上部结构视作绝对刚性, 如图 1(a), 在地基变形时, 各柱的下沉量是按线性分布的, 如果不考虑柱端的抗转动能力, 则可以把基础作为倒梁来处理, 它不产生整体弯曲; 当把上部结构视作绝对柔性时, 如图 1(b), 其对基础的变形没有约束作用, 于是基础在产生局部弯曲的同时, 还经受很大的整体弯曲。实际上结构物处于上述两种情况之间, 上部结构的刚度对基础的内力和变形的影响还与基础刚度、地基条件有关。因此, 探索共同作用分析方法对于正确考虑各部分对整体的影响、合理设计是非常重要的。

2 共同作用分析方法

多(高)层建筑上部结构、基础和地基的共同作用分析牵涉多种不同结构体模型的组合: 地基(土

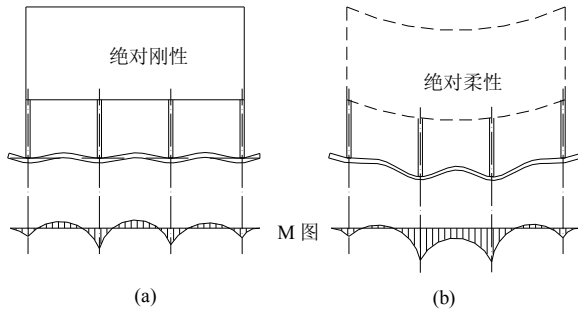


图 1 上部结构刚度对地基变形的影响及地基弯矩图

Fig. 1 Idealization model of superstructure and its effect on deformation

体)常作为连续体考虑, 上部结构和基础可以是板、梁、壳等结构体。共同作用分析要求上部结构、基础和地基满足在接触部位的变形连续性, 各个部件则可以根据具体的结构形式采用不同模型。

2.1 地基模型

地基模型是建筑结构基础分析中的关键因素。但由于土体性态的复杂性, 人们对土体的工程性质还不能完全地搞清, 技术人员根据各种工程实际, 提出了许多简化模型, 例如 Winkler 模型、弹性半空间模型、有限层模型等。随着计算机的发展和电算技术的进步, 有限元法被逐步应用于解决各种土木工程问题, 由于其具有适应能力强、可以考虑材料的复杂工程性质及荷载、边界的时程变化等优点, 有限元法已成为一个有力的分析工具。本文将采用非线性有限元法, 假定土体为弹塑性材料, 土体的本构模型采用修正剑桥模型, 但更加一般化, 其屈服函数的具体形式为:

$$f(p, q, r) = \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{p}{a} - 1 \right)^2 + \left(\frac{t}{Ma} \right)^2 - 1 = 0 \quad (1)$$

式中 M 为临界状态比; β 是一个参数, 其物理意义见下; a 是硬化参数。

P, q, r, t 为应力不变量, 其计算表达式为:

$$\left. \begin{aligned} p &= -\frac{1}{3} \text{trace}(\boldsymbol{\sigma}) \\ q &= \sqrt{\frac{2}{3}} (\boldsymbol{S} : \boldsymbol{S}) \\ r &= \left(\frac{9}{2} \boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{S} : \boldsymbol{S} \right) \\ t &= \frac{q}{2} \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{S}$ 为应力偏量向量; K 是一个参数。

参数 β 决定了 p - t 平面上屈服面的形状: 如图 2, 当 $p > a$ 时, $\beta = 1$; $p \leq a$ 时, $\beta \leq 1$, 这样, 屈服面

就由两条椭圆弧组成。如果 $\beta = 1$, 屈服面为一条椭圆弧, 即为剑桥模型形式。参数 K 则决定了屈服函数在子午面上的形状, 见图 3。引进 K 值是为了反映土体在三轴张拉和压缩时所表现出的不同的屈服应力值的特征, 当 $K=1$, 则转化为 Mises 圆。

采用相关塑性流, 屈服面的大小用 a 来定义, 变量 a 的变化体现了材料的硬化和软化。实验表明: 在塑性变形过程中, 在所关心的围压范围内, 土体的变形满足如下等式:

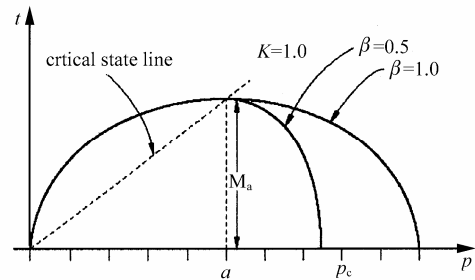
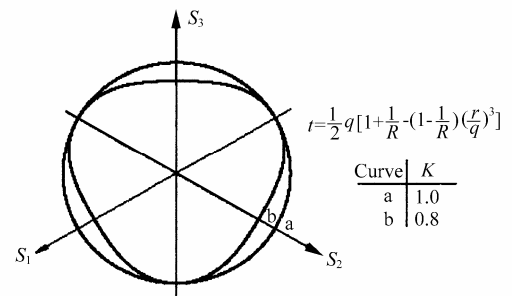
$$de = -\lambda d(\ln p) \quad (3)$$

式中 λ 是对数塑性体积模量; e 是孔隙比。

式(3)积分后可得:

$$a = a_0 \exp \left[(1 + e_0) \frac{1 - J^{pl}}{\lambda - \kappa J^{pl}} \right] \quad (4)$$

式中 κ 是对数硬化模量; J^{pl} 是对数塑性体积应变值; a_0 是与土初始压应力有关的参数。

图 2 p - t 平面上的屈服面形状Fig. 2 Configuration of yield surface on p - t plane图 3 π 平面上的屈服面形状Fig. 3 Configuration of yield surface on π plane

对于地基为深厚软弱土层的情况, 远场土体的变形对结构体的影响往往不能忽视。如果计算范围取得太大, 用有限元法将花费大量计算时间, 但引进无限元法, 则会节约很多工作量。根据半无限体上受集中荷载的弹性力学解答可知: 当 $r \rightarrow \infty$ 时, $u \rightarrow 0$; 当 $r \rightarrow 0$ 时, $u \rightarrow \infty$, 因此, 可以构造包含 $1/r$ 或 $1/r_2$ 项的形函数来反应这种情况。设位移函数为

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ U_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_i \\ Q_b \end{Bmatrix} \quad (11)$$

其实这是一个以 $\{U_i\}$ 和 $\{U_b\}$ 为未知量的线性方程组, 利用消元法消去 $\{U_i\}$, 则可以化简得只包含 $\{U_b\}$ 的方程组:

$$([K_{bb}] - [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}])\{U_b\} = \{Q_b\} - [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}\{Q_i\} \quad (12)$$

简写为:

$$[K_b]\{U_b\} = \{S_b\} \quad (13)$$

式中 $[K_b]$, $\{S_b\}$, $\{U_b\}$ 分别为等效刚度矩阵、等效荷载向量和边界节点位移向量。

如果先计算得上述子结构的 $[K_b]$, $\{S_b\}$, $\{U_b\}$, 在进行整体分析时就可以直接利用子结构的结果而不必考虑子结构内部, 由此可知: 应用子结构法使得系统矩阵(刚度和质量)减小。这就解决了大型模型计算存储和计算时间的难题, 但保留节点和保留自由度的数量必需是很少的, 利用子结构才有效, 这对于房屋结构是非常合适的。假设基础及桩土支承体系的刚度矩阵为 $[K_{sp}]$, 采用子结构法得到上部结构在基础边界的刚度矩阵和荷载向量分别为 $[K_b]$, $\{S_b\}$, 则共同作用分析的整体方程为:

$$[K_{sp} + K_b]\{U\} = \{Q\} + \{S_b\} \quad (14)$$

3 工程实例

某住宅楼小区的一栋楼房为 6 层住房, 外加一层半地下室供作车库及工具用房。基础采用沉管灌注桩, 柱下承台底的桩数为 4 根至 6 根不等; 上部结构为框架结构, 立柱的截面积为 $0.4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$, 横梁截面积为 $0.3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 。桩打至地表以下约 19 m 深的粘土层中, 管径 377 mm。楼房的布置在平面上呈长条形, 略微带一点弧度, 长约 90 m, 宽为 10.8 m。该建筑场地地面土层为第四系湖沼相和冲积相土, 软弱土层较厚, 深度可达 100 m 以上。

3.1 计算条件

由于三维计算比较复杂, 本次计算中沿纵向取一个柱列, 建立了上部结构、桩基础和地基共同作用的平面应变模型: 土体、桩和承台采用平面 8 节点实体元, 桩和承台与土体的接触面采用界面元模拟, μ_s 取相应土层的内摩擦角的正切值、 μ_k 按上述值的 0.9 计; 上部框架结构采用梁单元; 由于该处软弱土层较厚, 深部土层的沉降可能占楼房的最终沉降的相当部分, 故远场区域采用无限元。考虑土为弹塑性材料, 各土层的计算参数取值见表 1;

桩、和承台和上部框架假定其在弹性范围内工作, 弹性模量 $E=2.85 \times 10^7 \text{ kPa}$, $\nu=0.167$ 。计算分 7 步进行, 每一层施工作为一个计算步。

表 1 地基各土层的力学参数

土层名称	厚度 /m	内摩擦角/(°)	天然孔隙比	λ	κ	M	K	β
1	2.2	8.56	0.94	0.226	0.036	0.9	0.85	0.82
2	2.0	4.15	1.19	0.255	0.040	1.1	0.89	0.80
3	4.5	4.50	2.98	0.312	0.043	0.8	0.85	0.91
4	1.0	20.8	0.87	0.198	0.028	1.2	0.8	0.85
5	4.0	8.04	1.0	0.212	0.034	0.9	0.84	0.85
6	2.0	7.74	1.23	0.236	0.038	1.0	0.9	0.88
7	6.8	9.50	0.94	0.192	0.031	1.0	0.88	0.82
8	4.5	8.50	0.80	0.186	0.030	1.05	0.88	0.85
9	3.5	8.56	0.77	0.194	0.032	1.0	0.91	0.85

3.2 计算结果分析

图 6 给出了地表面、承台底部 2.3 m 和 6.8 m 水平面的沉降曲线, 从图上可以看出: 各水平面的沉降值几乎相等, 整个沉降曲线就象一个碟子一样, 形成了以基础为中心的一个沉降盆。地表面的最大沉降值为 151 mm。沉降值中间略大于两侧, 左侧略大于右侧, 这是因为左边的承台较右边的离中间承台近(见图 6), 群桩影响较大, 及地基中的附加应力大的原因, 但沉降差值不大, 约为 6 mm。

图 7 给出了桩底高程、桩底以下 3.6 m 和 15.2 m 水平面的沉降曲线, 从图上可以看出: 沿桩端向下, 沉降值减小, 桩端处有相当的刺入量。比较桩端及桩端以下 15.2 m 水平面的沉降曲线可以看出, 尽管它们之间约有 1.5 倍基础的宽度, 但沉降值还是很大。桩端以下 3.6 m 和桩端以下 15.2 m 的最大沉降值分别为 138 mm 和 120 mm。相差 18 mm, 这就说明沉降值衰减速度不快, 远场区域的沉降在本工程中占有很大的比重, 反应了在深厚软弱地基上考虑远场影响的必要性; 说明本次分析中采用无限元和有限元的合理性。

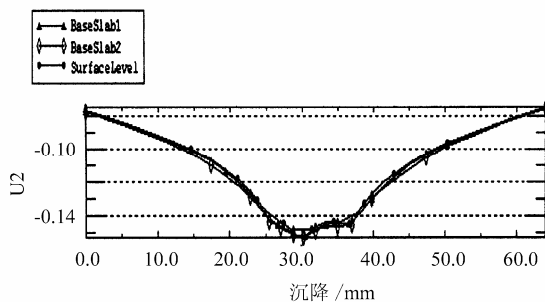


图 6 地面以下各水平线地基土沉降曲线

Fig.6 Settlement curve of foundation adjacent to the surface

(BaseSlabBot1——承台底部 2.3 m, BaseSlabBot2——承台底部 6.8 m, SurfaceLevel——地表面)

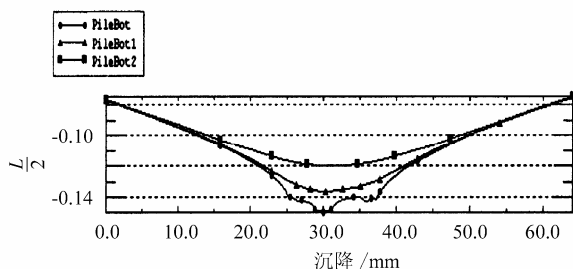


图 7 桩端以下各水平线地基土沉降曲线

Fig.7 Settlement curve of foundation below pile tip

(PileBot 代表桩底高程, PileBot1 代表桩底高程下 3.6 m, PileBot2 代表桩底高程下 15.2 m)

图 8 给出了地基的最终沉降等值线图,从图上可以看出,整个桩基础如同一个实体墩一样下沉。这与群桩沉降计算的等代实体墩基法是一致的。比较图 6 和图 7 可以得出,地表面的沉降和桩端的沉降相差不大,这说明桩的压缩量很小,这是因为该处的地基土的力学参数极低(见表 1),桩都为摩擦桩,再加上软弱土层较厚,深部软弱土层的沉降占主要部分。

图 9 给出了第一层和最后一层框架结构施工完以后左侧桩的桩侧摩阻力值分布图,从图上可以看出,随着上部荷载的增加,桩侧摩阻力逐渐发挥出来。桩侧阻力在桩端以上一段内显现出增强现象,这是由于桩端土受到桩的挤压而向四周滑移,使得桩端面以上的土体压紧桩体,所以摩擦力增加。

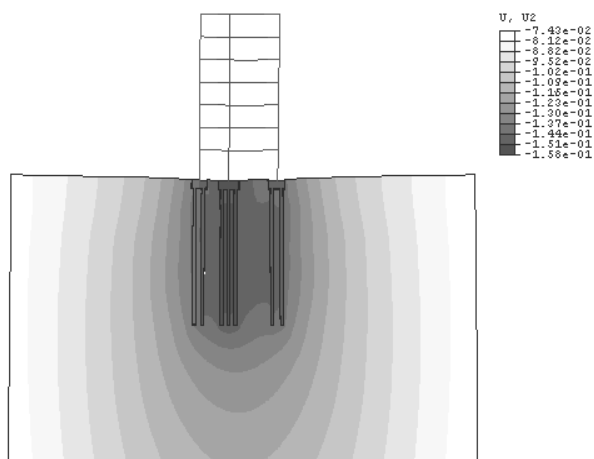


图 8 房屋和地基的最终沉降等值线图

Fig.8 Settlement contour of ground base

图 10 给出了框架柱端承台部位的沉降荷载历时曲线,可以看出:随着上部结构荷载的加大,沉降逐渐加大,沉降曲线近似为线性关系,中间的沉降略大于两侧,但差值不大。

从以上的计算结果是可以看出,计算结果是符合实际的,说明所采用的计算方法是合理的,能反

应深厚软弱地基上桩基础的变形规律。

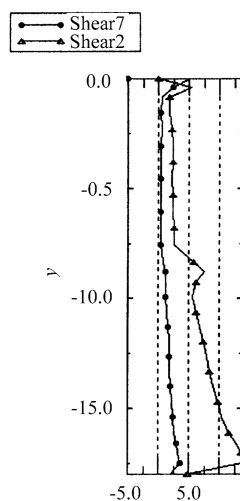


图 9 桩侧剪应力图

Fig.9 Shear stress curve of pile sides

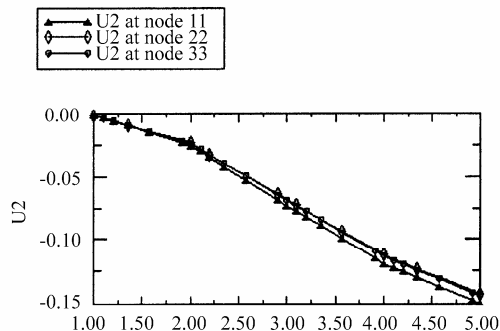


图 10.各柱端沉降历时曲线

Fig.10 Curve of column deformation at ground level

(11——中间柱, 22——左侧柱, 33——右侧柱)

4 结 语

多(高)层建筑上部结构、基础和地基的共同作用分析是随着工程建设的发展而提出的,在实践中已经逐步显示出了其对工程设计的指导性意义和采取迫切性。本文针对深厚软弱地基上多(高)层建筑桩基础,建立了多(高)层建筑桩基础共同作用的分析方法。通过后面的工程实例可以看出,本文所采用的方法是合理的。

工程实例的计算结果表明,对于深厚软弱地基上的桩基础,整个桩基础如同一个实体墩一样下沉,桩的压缩量较小,远场区域的沉降是影响基础沉降的主要因素。计算结果还表明桩侧摩阻力是随着上部荷载的增加而增大的,桩侧阻力在桩身下部靠近桩端附近显现出增强现象。