

厚筏刚性基础倾斜值估算

李连营 王 华 刘 坤

(天津市勘察院, 天津 300191)

【摘 要】 从弹性半空间 Boussinesq 解出发, 采用有限元法和压缩层地基模型, 探索计算厚筏基础倾斜值的方法, 计算厚筏基础的不均匀沉降和倾斜值, 并利用工程实例进行说明, 计算结果与实测结果较吻合。

【关键词】 地基柔度系数; 压缩层地基模型; 刚性基础; 倾斜值

【中图分类号】 TU 433

Inclined Value Estimation of Thick Raft Rigid Foundation

Li Lianying Wang Hua Liu Kun

(Tianjin Institute of Geotechnical Investigation & Surveying, Tianjin 300191 China)

【Abstract】 Based on the Boussinesq solution of elastic half space, the inclined value calculating method of thick raft foundation is inquired by using finite element method and compression level ground model to estimate the differential settlement and the inclined value of thick raft foundation. And the project example is given. Results of calculation are in accordance with that of the actual measurement.

【Key Words】 ground flexibility coefficient; compressed layer model of foundation; rigid foundation; inclined value

0 引 言

随着城市建设的发展和城市规划的需要, 特别是城市局部区域对建筑物高度的限制, 向地下开发空间是必然的发展趋势, 这类建筑(多为公建)柱距和单柱荷重均普遍较大, 一般有两种处理方法: 其一, 采用天然地基厚筏基础; 其二, 采用桩基础。天然地基厚筏基础造价较低, 缺点是如果地基土压缩模量较小时, 地基变形量较大, 设计能否成功的关键是控制地基变形和倾斜值。对于这类结构刚度较大的建筑, 规范以建筑物相邻柱基的沉降差及倾斜值为主要变形控制标准^[1], 而目前计算这类建筑物倾斜值尚无良好的计算方法。规范分层总和法计算基础的平均沉降量比较准确, 方法也比较简便, 但用其计算厚筏基础的倾斜值难度较大, 这就造成一些勘察、设计单位无法准确地计算出建筑物的倾斜值, 无法确定变形是否满足规范要求, 为了安全起见, 大部分建筑物采用桩基础, 增大了基础造价。本文从弹性半空间 Boussinesq 解出发, 采用有限元法, 探索计算厚筏基础倾斜值的方法, 并编制了一套计算程序, 估算建筑物的沉降、不均匀沉降和倾斜值, 使用效果良好。

1 基本理论介绍

1.1 厚筏基础假定为刚性基础

刚性基础是假定板和地基土相比是绝对刚性, 基础的弯曲挠度不致改变基底压力^[2]。厚筏基础具有良好的整体和较大的刚度^[3], 实测资料表明, 厚筏基础其本身的刚度非常大, 再受到上部结构的制约, 弯曲变形较小, 相对挠度在万分之几, 完全可作为刚性基础来考虑。本计算方法假定厚筏基础底板为刚性, 并将基础进行有限元划分成若干大小相等的区格^[4], 每个区格的基底压力为未知数, 厚筏基础底板各点最终沉降量可用平面方程来表示:

$$Z = Ax + By + C \quad (1)$$

式中: A 与 B 分别为底板 x 方向与 y 方向的倾角; C 为坐标原点的沉降值。

1.2 刚性基础变形协调方程

根据刚性基础假设条件, 刚性基础承受偏心荷载发生地基变形时, 沉降后基础底面可视为一个倾斜平面^[5], 由此建立基础和地基的变形协调方程, 再加上三个静力平衡方程, 即可联立求解整体倾斜。在计算中, 并可考虑相邻基础的影响, 见下式^[6]:

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} & -x_1 & -y_1 & -1 \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} & -x_2 & -y_2 & -1 \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ f_{n1} & f_{n1} & \cdots & f_m & -x_n & -y_n & -1 \\ x_1 A_1 & x_2 A_2 & \cdots & x_n A_n & 0 & 0 & 0 \\ y_1 A_1 & y_2 A_2 & \cdots & y_n A_n & 0 & 0 & 0 \\ A_1 & A_2 & \cdots & A_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \\ A \\ B \\ C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\Delta_1 \\ -\Delta_2 \\ \vdots \\ -\Delta_n \\ M_x \\ M_y \\ P \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: f_{ij} 为修正后地基柔度系数。

$$f_{ij} = k_{ij} \cdot \delta_{ij} \quad (3)$$

$$k_{ij} = \begin{cases} 1 (i=j) \\ 0.1 \sim 0.4 (i \neq j) \end{cases} \quad (4)$$

式中, k_{ij} 为地基模型系数, 它实际是考虑了土的应力、应变扩散能力后的折减系数, 当 $i \neq j$ 取 0 时, 成为文克尔地基模型, 取 1 时接近弹性半无限体模型, 基础边缘反力过大。一般软土取小值, 硬土取大值; δ_{ij} 为地基每个区格柔度系数; 矩阵中 M_x 、 M_y 、 P 分别为外荷载对坐标原点 x 、 y 向的总弯矩和总竖向荷载; A_1 、 A_2 、 \cdots 、 A_n 为各区格的面积; X_i 、 Y_i 为各区格形心坐标; Δ_1 、 Δ_2 、 \cdots 、 Δ_n 为基础以外的荷载对各区格中点产生的沉降, 计算方法与 f_{ij} 的计算方法相同, 应力值用实际荷载数值。

1.3 地基柔度系数

目前, 在地基变形分析中较常用的有弹性半空间模型和压缩层地基模型。

弹性半空间模型虽能较好地考虑应力、变形扩散能力, 但较实测结果为大, 并且这种模型所需的计

$$\sigma_{ij}(z) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arcsin \frac{ab}{\sqrt{b^2+z^2} \cdot \sqrt{a^2+z^2}} + \frac{abz(a^2+b^2+2z^2)}{(a^2+z^2)(b^2+z^2) \cdot \sqrt{a^2+b^2+z^2}} \right] (i=j) \\ \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{r^5} (i \neq j) \end{cases} \quad (6)$$

式中: a 、 b 分别为区格长宽的一半; r 为力作用点到计算变形点的距离; z 为计算点到基础底面的距离。

根据位移互等定理, $\delta_{ij} = \delta_{ji}$, 这样在地基柔度系数计算中将大大减小计算工作量。

1.4 地基土压缩模量

《建筑地基基础设计规范》明确规定, 计算地基变形时, 应按实际应力范围取值^[1]。对于厚筏型基础一般埋深均较大, 基础开挖后, 土的弹性效应使基础底面产生一定的回弹变形, 回弹变形的大小与地基条件、荷载大小、基础面积、暴露时间等因素有关, 影响因素较复杂, 尚难准确计算。随着基础施工进度, 直至建筑加载等于基坑开挖土的自重, 这个过程产生的地基变形为再压缩变形, 一般再压缩变形约

算参数土的变形模量 E_0 及泊松比 μ 不容易测定也是一个缺点。而压缩层地基模型能较好地反映地基土扩散能力, 并容易考虑土层沿深度变化及非均质性, 并且可以利用常规试验条件下的压缩模量, 按分层总和法计算。为了建立压缩层地基的柔度矩阵, 在划分基底网格的同时, 还要将它下面的地基分割成截面与网格相同的棱柱体, 其下端到达硬层顶面或压缩层下限, 各棱柱体依照天然土层界面和计算精度要求分成若干计算层, 设分层数为 S , 则给出每层土的压缩模量, 便可计算柔度系数 δ_{ij}

$$\delta_{ij} = \sum_{m=1}^s \int_{h_{m-1}}^{h_m} \frac{\sigma_{ij}(z)}{E_{im}} dz \quad (5)$$

式中: δ_{ij} 为地基区格柔度系数, 即第 j 区格上施加单位均布压力对第 i 区格中点的沉降, 可采用分层总和法计算; S 为土层总数; h_{im} 为第 i 区格中点下第 m 层土的深度; E_{im-1} 为第 i 区格中点下第 $m-1$ 层土的压缩模量; $\sigma_{ij}(z)$ 为第 j 区格单位压力下, 对第 i 区格中点在深度 z 处引起的压应力, 由布辛奈斯克公式及其积分式给出:

为最终沉降量的 20%~30%^[5,7]。在土的自重应力阶段, s (沉降)- P (荷载)- t (时间)的关系基本上是线性关系, 因此本阶段可视为弹性变形阶段, 所用的压缩模量可按再压缩曲线求得。建筑加载从超过自重应力起至设计荷载的总应力止, 建议采用实际应力状态下压缩模量。

2 工程实例

某商场占地 104 m × 41 m, 地上 4~5 层, 高 24.6 m, 地下有 1 层防核辐射的地下人防工程, 基础埋深 6.80 m, 商场北侧外延 6 m 地下室上无建筑, 致使上部结构荷载分布不均匀, 能否采用天然地基的关键是建筑物的倾斜值能否满足规范要求。场地各层土物理力学指标见表 1。

表1 各层土物理力学指标表

土层	土类	底界埋深/m	含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e	塑性指数 $I_p/\%$	液性指数 I_L	压缩模量 $E_{s(1-2)}/\text{MPa}$
①	填土	3.4						
②	粘土	4.8	28.3	19.4	0.81	18.8	0.54	4.8
③	粉质粘土	5.5	31.8	19.0	0.91	11.9	0.69	6.1
④	粉土	10.2	27.0	19.8	0.77	9.2	0.72	14.7
⑤	粉质粘土	11.8	29.2	18.8	0.83	12.3	1.03	5.8
⑥	粉质粘土	15.8	30.8	19.2	0.87	11.4	0.84	7.0
⑦	粉质粘土	16.5	28.7	19.4	0.82	13.1	0.91	5.5
⑧	粉质粘土	20.6	28.1	20.0	0.79	12.0	0.80	6.6
⑨	粉质粘土	26.5	24.7	19.8	0.69	10.9	0.65	8.2
⑩	粉土	29.2	24.6	20.2	0.70	9.0	0.68	15.6
⑪	粉质粘土	38.3	26.1	20.1	0.73	15.0	0.79	6.2
⑫	粉质粘土	45.0	26.0	20.0	0.68	11.6	0.41	7.5

3 倾斜值估算

将5层商场(包括外延地下室)划分为40个单元,单元划分示意图见图1。建筑物总荷载为622 000 kN,基底附加荷载为315 470 kN,按本文方法编制程序计算坐标原点, y 坐标方向偏心距为0, x 坐标方向偏心距为416 586 kN·m; y 方向转角为0, x 方向转角为0.001 4(弧度),拟建物各角点及外延地下室角点沉降值见表2。

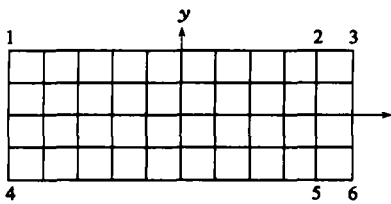


图1 基础有限单元划分示意图

表2 各点计算沉降值

计算位置	1	2	3	4	5	6
计算沉降值/cm	10.25	10.12	9.28	10.03	9.86	9.15

4 实际观测资料

该商场实际采用天然地基、厚筏基础,筏板厚1.20 m,根据建筑物沉降稳定后的沉降观测资料,上述6点的实际沉降值见表3。

表3 各点沉降观测值

观测位置	1	2	3	4	5	6
观测沉降值/cm	8.95	8.05	7.29	8.82	8.12	7.38

根据以上观测结果计算,拟建商场南北向最大

倾斜值为0.001 27,倾斜值很小,满足规范要求,与计算结果也较吻合。

5 结论

1)本文从弹性半空间 Boussinesq 解出发,采用压缩层地基模型,利用有限单元法估算厚筏基础的倾斜值,通过在一些工程应用效果较好,能够解决一些常规方法无法解决的问题。

2)当荷载大于自重应力时,应采用实际应力状态下的压缩模量,比较符合地基土的实际应力-应变关系。该方法模型简单,压缩模量用常规试验方法即可获得,便于在实际工程中应用。

参 考 文 献

- [1] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国工业出版社,2002:26-27.
- [2] [美] H.F. 温特科恩,方晓阳. 基础工程手册[M]. 北京:中国工业出版社,1986:727-729.
- [3] 黄绍铭,高大钊. 软土地基与地下工程[M]. 北京:中国工业出版社,2005:224-229.
- [4] 王 华,李连营. Mindlin 位移解在桩基沉降计算中的应用[J],岩土工程师,1999(4):19-25.
- [5] 陈祥福. 沉降计算理论及工程实例[M]. 北京:科学出版社,2005:125-126.
- [6] 华南工学院. 地基及基础[M]. 北京:中国工业出版社,1980:254-258.
- [7] 宰金珉,宰金璋. 高层建筑基础分析与计算[M]. 北京:中国工业出版社,1993:198-199.

收稿日期:2007-03-15