

文章编号:1005-0523(2000)01-0001-06

人防工程拱基础结构受力分析

赵 雷, 卜一之

(西南交通大学 桥梁及结构工程系, 四川 成都 610031)

摘要: 利用有限元法建立空间杆系结构模型, 对某人防工程钢筋混凝土拱基础进行了结构受力分析, 并讨论了该拱式结构的拱轴线为抛物线和圆曲线以及考虑几何非线性影响的结构行为¹⁹。

关键词: 拱; 钢筋混凝土; 结构行为; 有限元法; 几何非线性

中图分类号: O322; TP301

文献标识码: A

0 引言

随着我国社会主义建设事业的蓬勃发展, 人民生活水平不断提高, 城市建筑群日益增多¹⁹。在地面建筑结构飞速发展的同时, 地下建筑结构也与日俱增¹⁹。如何保障同一位置处地面建筑和地下结构物的安全性, 早已引起土木工程界的高度重视¹⁹。笔者通过在某人防工程地面修建一幢多层居民住宅楼时对该人防工程拱基础的受力问题所进行的空间有限元分析, 探讨在既定拱基础结构形式下, 采用不同的拱轴线以及考虑几何非线性对其结构行为的影响, 为评价该拱基础的安全性提供必要的计算参数¹⁹。

1 结构概况

该人防工程位于某城市居民区, 其上拟建多层钢筋居民住宅楼, 其对人防工程拱基础的力学作用通过底层基础的钢筋混凝土柱传至人防工程的拱基础上, 如图1所示¹⁹。该人防工程拱基础为四肋钢筋无铰拱式结构, 肋间以三道横撑相连构成一空间无铰拱式格构体系¹⁹。拱基础的拱圈跨度为 $L = 18.8184 \text{ m}$, 横向宽度 $\beta = 11.38 \text{ m}$, 计算简图如图2所示¹⁹。每根拱肋均为 C30 钢筋混凝土等截面构件, 矩形截面尺寸为 $1 \times 1.2 \text{ m}$; 横撑亦为等截面的 C30 钢筋混凝土构件, 矩形截面尺寸为 $0.6 \times 1 \text{ m}$ ¹⁹。地面建筑传至拱基础的力分别由该住宅楼基础的 22 根承力柱提供, 前侧 1[#] 和 2[#] 拱肋上各有根承力柱的作用¹⁹。全部承力柱对拱基础的合力为: 沿拱式结构跨度方向的纵向力 $\sum F_x = 21 \text{ kN}$, 横向力 $\sum F_y = 67 \text{ kN}$, 竖向力 $\sum F_z = 37\,906 \text{ kN}$; 纵向弯矩 $\sum M_x = 45 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 横向弯矩 $\sum M_y = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 竖向弯矩 $\sum M_z = 0$ ¹⁹。

2 拱基础的空间有限元线弹性分析

收稿日期: 1999-09-15; 修订日期: 1999-10-18

基金项目: 西南交通大学科学研究基金 (1999XM17)¹⁹。

作者简介: 赵 雷 (1956-), 男, 四川西充人, 西南交通大学桥梁及结构工程系副教授, 工学博士¹⁹。

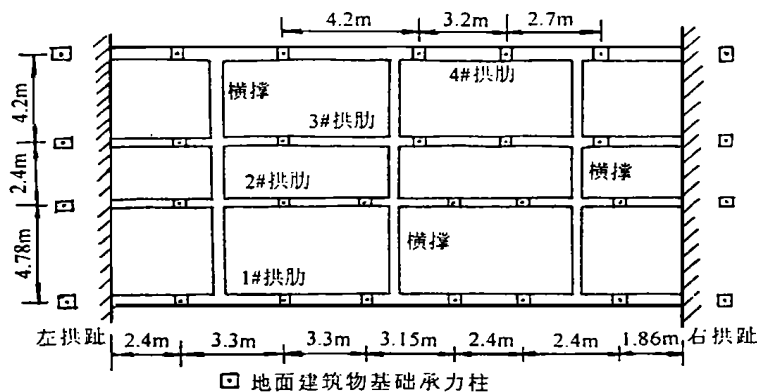


图 1 地面建筑作用于人防工程拱基础示意图

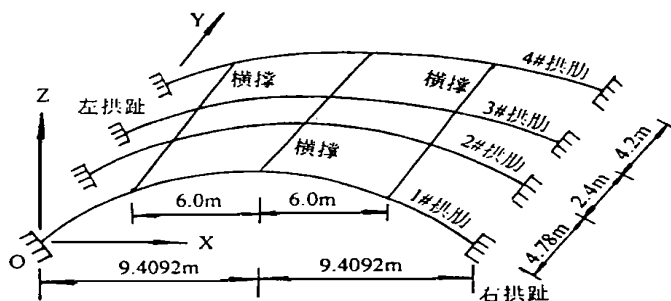


图 2 人防工程拱基础的拱式结构计算简图

该人防工程拱基础的模仿式结构类型的空间梁单元,共 172 个;其中每根拱肋离散为 30 个第 1 类梁单元,四根拱肋共有 120 个此类单元,肋间横撑离散为 57 个第 2 类梁单元¹⁹在内力分析中,钢筋砼构件的截面按毛截面处理¹⁹。

2.1 拱轴线为二次抛物线时的结构分析

拱基础的拱式结构之拱轴线为二次抛物线,其方程为

$$Z = h - \frac{4h}{L^2} \left(X - \frac{L}{2} \right)^2 \quad (1)$$

式中: L 为拱的跨度, $L = 18.818 \text{ m}$; h 为拱的矢高, $h = 4.661 \text{ m}$ ¹⁹此时,拱基础的拱式结构自重 $P_w = 2964 \text{ kN}$ ¹⁹受力分析中考虑以下 2 个计算工况¹⁹。

工况 1: 抛物线无铰拱基础受拱式结构自重与地面建筑的作用;

工况 2: 在工况 1 中再考虑该拱基础左、右拱脚向外平位移各为 $\Delta_x = 5 \text{ mm}$ ¹⁹。

上述 2 种计算工况下,拱式结构 4 条平行拱肋中以前侧 1[#]拱肋的受力与变形最为不利,其沿跨度方向变化的竖向挠度及主要内力分别示于图 3~6¹⁹。图中竖向挠度以向上为正,截面轴力以拉力为正,弯矩 M_y 以拱内侧受拉为正,弯矩 M_z 则以矢量方向沿 OZ 轴正向为正¹⁹。

2.2 拱轴线为圆曲线的结构分析

拱基础的拱式结构的拱轴线为圆曲线,其方程为,

$$(Z + R + h)^2 + (X - L/2)^2 = R^2 \quad (2)$$

式中: L 为拱的跨度, $L=18.818\text{ m}$; h 为拱的矢高, $h=4.647\text{ m}$; 拱半径 $R=11.85\text{ m}$ ¹⁹。

对应的拱式结构自重为 $P_w=2\,986\text{ kN}$, 内力分析中仍划分为2个计算工况¹⁹。

工况3: 园弧无铰拱基础受拱式结构自重与地面建筑的作用;

工况4: 在工况3中再考虑该拱基础左、右拱脚向外水平位移各为 $\Delta X=5\text{ mm}$ ¹⁹。

上述2种计算工况下, 拱式结构4条平行拱肋中以前侧1[#]拱肋的变形与内力最为不利, 将此2种计算工况中1[#]拱肋沿跨度方向变化的竖向挠度与截面主要内力示图3~6中¹⁹。

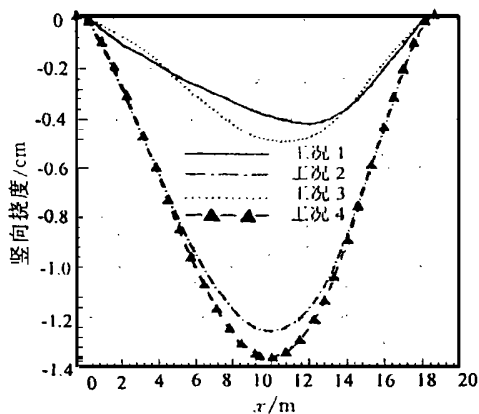


图3 各工况下1[#]拱肋竖向挠度图

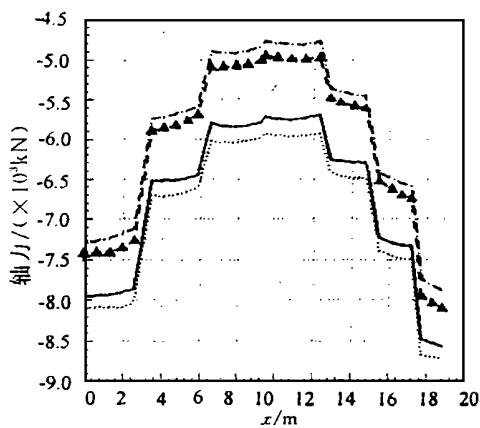


图4 各工况下1[#]拱肋轴力图(图线同图3)

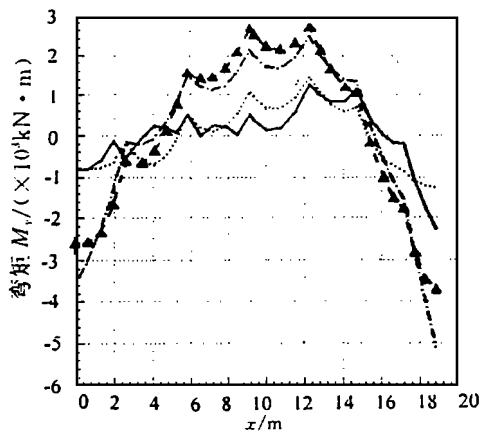


图5 各工况下1[#]拱肋弯矩 M_y 图(图线同图3)

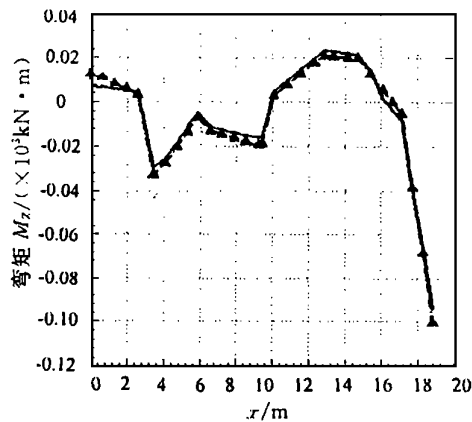


图6 各工况下1[#]拱肋弯矩 M_z 图(图线同图3)

3 拱式结构的几何非线性分析

结构的平衡实际上是在结构发生变形之后达到的, 对于拱式结构的几何非线性问题而言, 平衡方程必须建立在结构变形之后的状态上¹⁹。本文描述拱式结构变形的参考系统是让单元的局部坐标系随结构一起发生变化, 即采用 Euler 法的“流动坐标”描述结构的几何非线性影响¹⁹。文中所用杆件单元流动坐标中的单元分析是建立在变形后的平衡位置上的, 在 xoy 平面

内的几何非线性分析的描述如图 7 所示¹⁹图 7(a) 为杆件 ij 在变形前的状态, 图 7(b) 为该杆件在变形后的位置与状态, x', y' 是单元的流动坐标, xoy 是结构的整体坐标, 可以看出

$$x_1 = x_0 + u_j - u_i, y_1 = y_0 + v_j - v_i, \tan \alpha = y_1/x_1 \quad (3)$$

单元在流动坐标系中的结点位移为

$$\left. \begin{aligned} u'_i &= v'_i = v'_j = 0, & u'_j &= l - l_0 = (x_1^2 + y_1^2)^{1/2} - l_0 \\ \theta &= \theta - (\alpha - \alpha), & \theta'_j &= \theta - (\alpha - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

相应的单元结点位移列阵为

$$\delta = [0 \quad 0 \quad \theta \quad u_j^1 \quad 0 \quad \theta]^T \quad (5)$$

在流动坐标系中描述单元的平衡方程为

$$f'_e = k'_e \delta \quad (6)$$

式中: f'_e 为与 δ 对应的单元杆端内力, k'_e 为一般的局部坐标系下的单元刚度矩阵^[13]

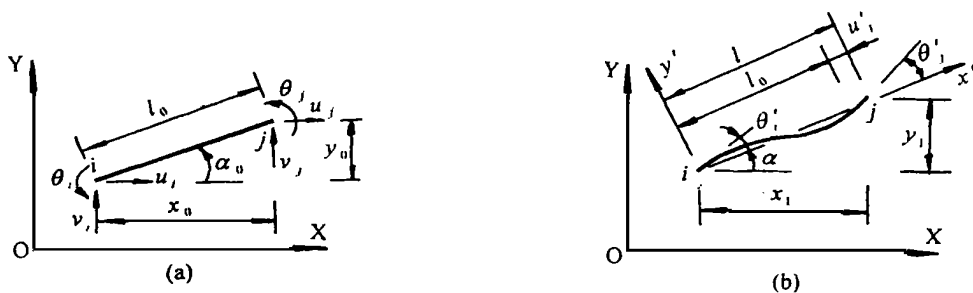


图 7 杆件单元在流动坐标系中的单元分析

由于采用流动坐标, 方向角 α 是变位的函数, 因而结构坐标系下的单元刚度矩阵也是变位的函数, 于是构成了一个迭代计算过程, 相应的迭代计算公式可概括为

$$\left. \begin{aligned} K_r^{(i)} \delta^{(i+1)} &= P - \sum K_e^{(i)} \delta \\ D^{i+1} &= D^{(i)} + \delta^{(i+1)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: 右上标 $i, i+1$ 分别表示迭代次数, D 为结构的结点位移列阵; K_r 为包含几何刚度矩阵在内的结构整体刚度矩阵, 即

$$K_r = K_E + K_G \quad (8)$$

式中: K_E 、 K_G 分别为结构的弹性刚度矩阵和几何刚度矩阵, 由各单元的相应刚度矩阵 R_{Ee} 和 R_{Ge} 组集而成^{[2][13]}

迭代计算的收敛性判别可采用位移、残余力或能量收敛准则^[3], 本文采用位移收敛条件, 并以位移向量 D 的二范数(平均值)度量^[4], 即

$$N_s = (D^T D)^{1/2} \quad (9)$$

当

$$\frac{N_s^{(i+1)} - N_s^{(i)}}{N_s^{(i+1)}} \leq \epsilon \quad (10)$$

时, 认为迭代收敛^[13] ϵ 为精度指标, 根据工程要求和问题的性质而定, 一般可取 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ ^[13] 考虑拱式结构的几何非线性时, 取 $\epsilon = 10^{-3}$ ^[13]

在加载过程中,结合增量法,将总荷载 P 分为若干增量加载,即

$$P = \sum_{j=1}^m \Delta P_j \quad (11)$$

每一增量加载 ΔP_j 过程中引入式(7)~(10)表示的迭过程,将 P 用 ΔP_j 取代,并且在 ΔP_j 加载结束后的总位移为

$$D_j = D_{j-1} + \Delta D_j \quad (12)$$

式中:右下标 j 、 $j-1$ 分别表示第 j 、第 $j-1$ 级增量加载¹⁹。

在对本文考虑的拱式结构的几何非线性分析中,将总荷载 P 分为 21 个增量步,即 $m=21$ ¹⁹。最大的一级增量荷载为 $10\%P$,最小的一级增量荷载为 $1\%P$ ⁽¹³⁾。由于采用了变步长的增量迭代法,收剑较快,多则 7~8 次,少则 1~2 次,迭代即可收敛,两种形式的拱轴线之拱式结构在自重及地面建筑作用下的各拱肋的变形及受力仍以 1# 拱肋最为不利⁽¹³⁾。

4 计算结果的分析

4.1 拱脚水平位移对结构行为的影响

拱式结构左、右支座向外的水平位移对拱基础的拱肋变形与受力均不利⁽¹³⁾。当拱轴线为二次抛物线时,工况 2 与工况 1 相比,在拱肋控制截面中,最大竖向挠度增大约 2.4 倍,虽然轴向压力的最大值减少约 8%,但弯矩 M_y 的最大值却增大约 122%;当拱轴线为圆弧拱时,工况 4 与工况 3 相比,在拱肋控制截面中,最大竖向挠度增大约 1.9 倍,虽然轴向压力的最大值减少约 7%,但弯矩 M_y 的最大值却增大约 278%¹⁹。可见,无论采用何种形式的拱轴线,加强拱式结构左、右支座的抗推能力将有助于改善拱式结构的变形与受力状态,这与钢筋混凝土无铰拱桥在支座沉陷下的结构行为是一致的¹⁹。此外,在左座水平位移情况下,拱肋截面的横向弯矩 M_z 基本没有变化¹⁹。

4.2 不同形式的拱轴线导致拱式结构不同的受力状态

拱式结构采用二次抛物线无铰拱或圆弧线无铰拱时,其结构行为有较大差异¹⁹。拱轴线采用园曲线与二次抛物线相比较,不考虑拱脚向外的水平位移时,拱肋控制截面中,最大竖向挠度增大约 27%,轴向压力的最大值增大约 2%,弯矩 M_y 的最大值减少的约 32%,另一弯矩 M_z 则变化较小;考虑拱式结构的拱脚向外水平位置时,拱肋控制截面中,最大竖向挠度增大约 9%,轴向压力的最大值增大约 3%,弯矩 M_y 的最大值,则减少约 26%¹⁹。

4.3 几何非线性对拱式结构行为的影响

该拱式结构的几何非线性效应并不十分明显¹⁹。在拱肋控制截面的变形和内力中,计入几何非线性的影响后,对应于拱轴线分别为二次抛物线和园曲线的情况,最大纵向变形 $U_{x,\max}$ 比线弹性分析值增大 0.37%和 0.44%,最大横向变形 $V_{y,\max}$ 比线弹性分析值增大 1.09%和 0.52%,最大竖向挠度 $W_{z,\max}$ 比线弹性分析值增大 0.08%和 0.21%;轴向压力的最大值比线弹性分析值增大 0.18%和 0.43%⁽¹³⁾。因此,该拱基础的拱式结构分析中,可以不考虑几何非线性的影响⁽¹³⁾。

4.4 建议采用的拱基础之拱轴线

拱式结构的拱轴线为园曲线时,线型简单,施工方便,其结构行为与拱轴线采用二次抛物

线时相比,虽然拱肋控制截面的最大竖向挠度有所增大,但其值却相对较小,不计拱脚向外的水平侧移时仅为 0.4694 cm ;拱肋控制截面的最大轴向压力略增大,但增幅不超过 3% ;拱肋控制截面弯矩 M_y 的最大值显著减小,减幅达到 56.8% (不考虑拱脚向外的水平位移时)和 26.5% (考虑拱脚向外的水平位移时)¹⁹。对照桥梁工程中拱桥跨度不超过 20 m ,矢跨比较小($h/L=0.2\sim 0.5$)时,可采用园给拱的建议^[5],综合该拱式结构的空问受力分析结果,将该人防工程拱基础的拱式结构取为园弧拱是比较适宜的¹⁹。

5 结 语

人防工程拱基础的结构行为分析是确保地面建筑与人防工程安全的重要研究内容之一¹⁹。在较小跨度的拱式结构中,宜采用园弧拱,并可以不考虑几何非线性影响¹⁹。拱脚的水平位移对拱式结构的内力与变形影响较大,结构设计中应注意加强拱式结构的抗推能力,保证工程安全和可靠¹⁹。

[参 考 文 献]

- [1] 朱慈勉等¹⁹.计算结构力学[M]¹⁹.上海:上海科学技术出版社,1992¹⁹.
- [2] 李国豪¹⁹.桥梁结构稳定与振动(修订版)[M]¹⁹.北京:中国铁道出版社,1996¹⁹.
- [3] D R J Owen, E Hinton. Finite Elements in Elasticity Theory and Practice[M]. Pineridge Press Limited, London, 1980.
- [4] 赵 雷, 张金平¹⁹.大跨度拱桥施工阶段非线性稳定分析若干问题的探讨[J]¹⁹.铁道学报, 1995, 17(1): 76~84¹⁹.
- [5] 范立础¹⁹.桥梁工程(第2版)[M].北京:人民交通出版社,1996.

Structural Analysis of an Arch-Foundation for Air-Raid Engineering

ZHAO Lei, BU Yi-zhi

(Department of Bridge and Structure Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on a three-dimensional structural model with members·calculation and analysis of an reinforced concrete arch-foundation for air-raid engineering are completed by means of space finite elements Structural behaviors of the arch-foundation with parabolic no-hinge arch and circular no-hinge arch, as well as effects of structural geometrical nonlinearity, are also discussed in detail·

Key words: arch; reinforced concrete; structural behavior; finite element method; geometrical nonlinearity