

钢筋混凝土门式及封闭式 单元框架柱的非线性二阶效应分析

白绍良 汪 强 刘少勇

(建筑工程系)

摘 要 本文给出了钢筋混凝土框架非线性二阶效应电算分析的基本思路及步骤, 并以最基本的门式单元框架及封闭式单元框架为对象, 系统分析了竖向及水平荷载、梁-柱线刚度比以及柱的细长度等因素对柱控制截面二阶弯矩的影响规律。并以修订后的《混凝土结构设计规范》中的偏心距增大系数 η 的计算公式为基点, 给出了能较准确反映上述两类框架柱控制截面二阶弯矩的当量标准柱长度(计算长度) l_0 , 以及该当量长度随各影响因素变化的规律及其拟合公式。

关键词 钢筋混凝土, 框架, 柱, 二阶效应, 计算长度

在钢筋混凝土框架柱的正截面强度设计中, 由于精确的非线性二阶效应分析方法过于复杂, 各国设计规范一般均采用近似计算方法, 且其基本思路都是一致的。具体做法是先建立两端铰支等偏心距标准柱高度中点截面在最大轴力作用下的二阶弯矩计算公式, 再寻找能分别给出各种受力情况下各类框架不同柱段控制截面二阶弯矩的标准柱当量长度, 即框架柱计算长度。在设计中就可以用这样求得的且经过一定简化处理的计算长度代入标准柱二阶弯矩计算公式以求算框架柱相应控制截面的二阶弯矩。

为了找到能给出尽可能接近实际二阶弯矩的标准柱当量长度, 曾试用过各种方法。随着近年来各国学者对近似计算方法的不断改进, 用近似法求得的二阶弯矩与实际值之间的差距正在逐步减小。但是应该承认, 我国设计规范, 其中包括方才修订过的《混凝土结构设计规范》所采用的确定标准柱当量长度的方法还是比较陈旧的。与标准柱二阶效应计算公式的准确性相比, 框架柱当量长度的取值准确性很差。二者虽互相依存但准确性不相匹配。这已成为我国设计规范构件强度设计规定中的一个重要遗留问题。因此, 根据较准确的非线性分析结果对框架柱的标准柱当量长度取值进行校准已成为当务之急。

到目前为止, 钢筋混凝土杆系结构非线性分析的基本思路及程序设计的基本方法已经较为成熟, 但国内外至今尚未见到公开发表的对钢筋混凝土框架柱二阶弯矩的系统计算结果。

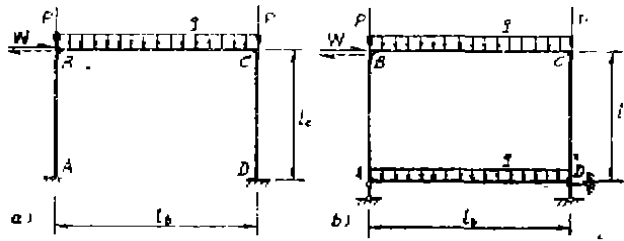


图 1 本文分析的两类基本单元框架

本文在给出钢筋混凝土框架非线性二阶效应分析程序的基础上，作为分析工作的第一步，首先以最基本的单元框架，即能反映单跨多层框架底层受力特点的门式框架（图1a）以及能反映单跨多层框架除底层外其它各层受力特点的封闭式单元框架（图1b）为对象，探讨各类影响因素对这两种框

架柱控制截面二阶弯矩的影响程度及影响规律。在本文分析结果的基础上，已着手对不同跨数及层数的有代表性的规则框架进行非线性二阶效应分析，其结果将在另文中介绍。

1 钢筋混凝土框架非线性二阶效应分析的电算程序

明显的材料非线性与杆件的几何非线性并存是钢筋混凝土框架受荷反应的基本特征。其中，材料非线性主要通过截面分析，即截面的弯矩-轴力-曲率关系来体现。本文分析中采用的混凝土及钢筋的本构模型如图2 a、b所示。在处理弯矩-轴力-曲率关系时，本文未采用传统的三折线假定，而是按一定的曲率步长进行多点计算，然后通过线性内插确定杆件内各子单元的刚度。这样就不必每次算出一条完整曲线。计算的点数多少则视作用于杆件的最大弯矩而定。截面弯矩-轴力-曲率关系的具体计算步骤详见文献[1]、[2]，此处不再赘述。

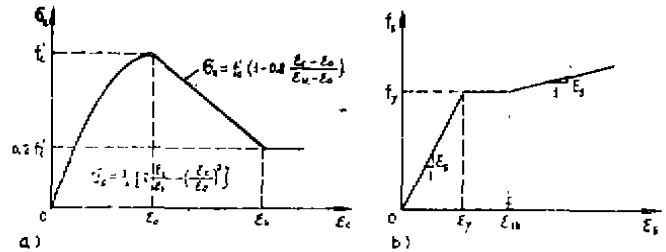


图 2 计算中使用的混凝土及钢筋的本构模型

参照图3，在框架每个杆件中可通过以下由梁、柱平衡条件导出的微分方程

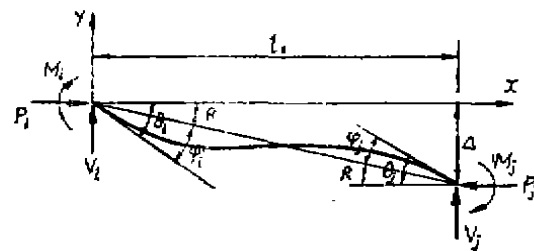


图 3 杆件基本物理及几何参数

求得一般形式的转角-挠度方程：

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = [M_i + P_i(-y) + V_i x] \quad (1)$$

求得一般形式的转角-挠度方程：

$$\begin{cases} M_i = Sk\theta_i + Ck\theta_j - k(S+C) \frac{\Delta}{l} \\ M_j = Ck\theta_i + Sk\theta_j - k(S+C) \frac{\Delta}{l} \end{cases} \quad (2)$$

在上式中， k 为线刚度， S 和 C 为稳定函数，其定义为，

$$S = \frac{\phi \sin \phi - \phi^2 \cos \phi}{2 - 2 \cos \phi - \phi \sin \phi} \quad (3)$$

$$C = \frac{\phi^2 - \phi \sin \phi}{2 - 2 \cos \phi - \phi \sin \phi} \quad (4)$$

其中

$$\phi = l \sqrt{\frac{P_i}{EI}} \quad (5)$$

显然, S 和 C 可以视为当仅发生杆端转动位移时, 由于轴向力的存在, 转动刚度系数和传递系数的修正值。

从对图 3 j 点的力矩平衡条件可以得出下列剪力方程:

$$\begin{aligned} V_i = -V_j &= -\frac{M_i + M_j + P_i \Delta}{l} \\ &= -(S+C) \frac{k}{l} \theta_i - (S+C) \frac{k}{l} \theta_j + \left[2(S+C) \frac{k}{l^2} - \frac{P_i}{l} \right] \Delta \end{aligned} \quad (6)$$

而当 $P_i < 0$, 即当轴向力为拉力时, S 和 C 将分别变为:

$$S = \frac{\phi^2 \cosh \phi - \phi \sinh \phi}{2 - 2 \cosh \phi + \phi \sinh \phi} \quad (7)$$

$$C = \frac{\phi \sinh \phi - \phi^2}{2 - 2 \cosh \phi + \phi \sinh \phi} \quad (8)$$

再引入轴向刚度 EA , 则从以上诸式可得杆单元刚度矩阵为:

$$\begin{Bmatrix} P_i \\ V_i \\ M_i \\ P_j \\ V_j \\ M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 & -EA/l & 0 & 0 \\ 0 & B & -A & 0 & -B & -A \\ 0 & -A & Sk & 0 & A & Ck \\ -EA/l & 0 & 0 & EA/l & 0 & 0 \\ 0 & -B & A & 0 & B & A \\ 0 & -A & Ck & 0 & A & Sk \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

或写成

$$\{\bar{F}\}^{(e)} = [\bar{k}]^{(e)} \{\bar{u}\}^{(e)} \quad (10)$$

以上各式中 $A = (S+C)k/l$, $B = 2A/l - P_i/l$, $\{\bar{F}\}^{(e)}$ 为公式 (9) 左端的杆端内力列阵, $\{\bar{u}\}^{(e)}$ 为与 $\{\bar{F}\}^{(e)}$ 对应的杆端位移列阵, $[\bar{k}]^{(e)}$ 为单元刚度矩阵。在 $[\bar{k}]^{(e)}$ 中已包含了轴向力的影响。

按以上模型可以用增量变刚度法编制出不同用途的钢筋混凝土框架非线性分析程序。对于二阶效应问题, 宜采用迭代法求解, 其程序设计的思路及方法示于图 4。程序设计的细节及所采取的具体处理手法详见文献 [1]、[2]。需要指出的是, 在本文计算中未考虑梁、柱剪切变形以及钢筋锚固端在框架节点中的粘结滑移所造成的梁端附加转角。经大量复核计算证明该程序具有良好的稳定性及可靠性。

2 钢筋混凝土门式框架柱的二阶效应

图 1a 所示单层单跨且柱脚为固定的门式框架可以看作框架结构的基本单元之一。以往分析结果表明, 框架柱中由轴向压力和杆件变形相互作用所形成的二阶效应由以下两部分组

成。第一部分为在无侧移情况下由轴向力及杆件轴线挠曲变形的相互作用所形成的二阶效应，通常称 $P-\delta$ 效应。第二部分则是在有侧移情况下由轴向力和杆端相对侧移的相互作用所形成的二阶效应，通常称 $P-\Delta$ 效应。这两种子效应在刚度矩阵中分别通过 S 和 C 函数以及剪力平衡方程 (6) 中与 P 有关的附加项来考虑。显然，各个单杆的二阶效应将会对整个

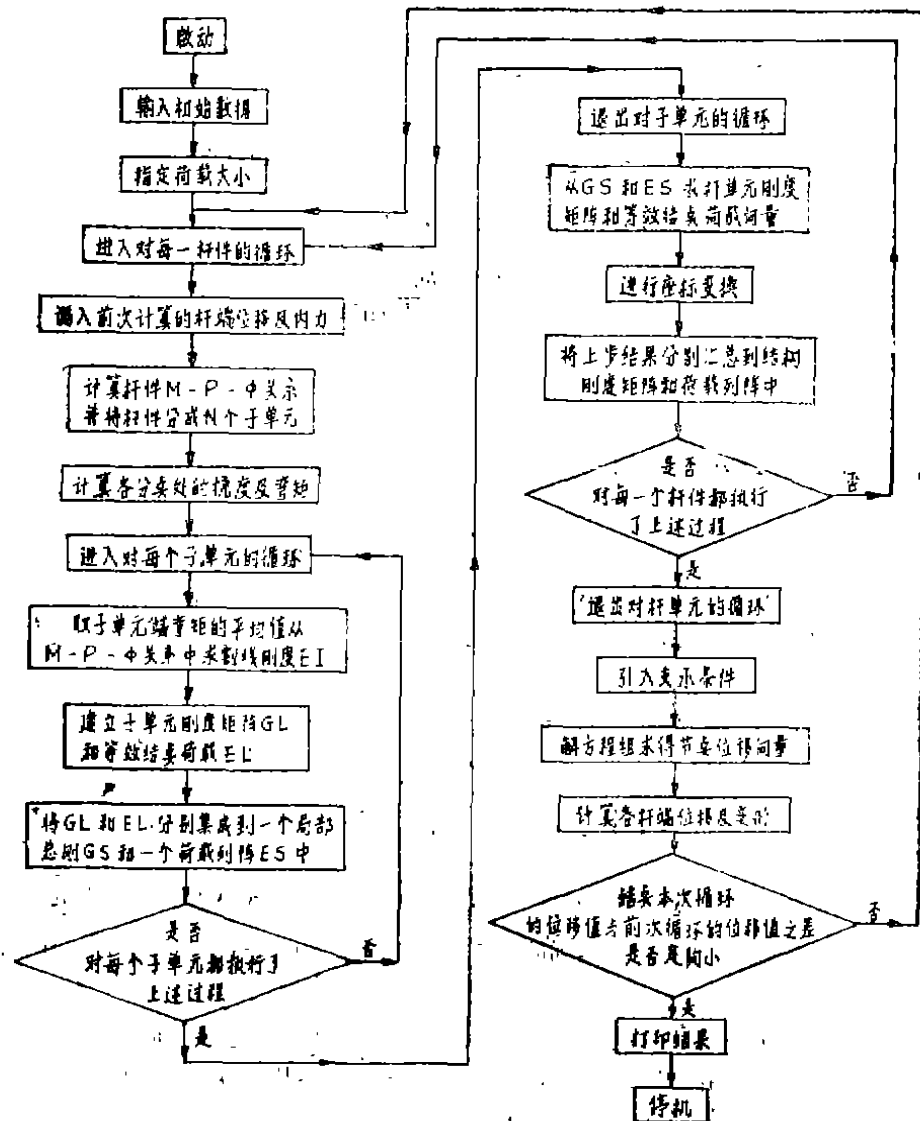


图4 钢筋混凝土框架非线性分析框图

结构的内力产生影响，并导致结构内力的重分布。在进行内力分析时，这种重分布是在迭代过程中实现的。正是由于各个杆件之间的相互约束，相互影响，使得结构柱的二阶效应与理想端约束条件下的单根杆件有明显差异。

计算分析表明，在门式刚架柱中，较大的 $P-\delta$ 弯矩可能发生在柱脚截面以及上半段柱的中部某个截面，且与无侧移状态下一般竖向荷载所引起的一阶弯矩作用方向相同，而柱顶截

面的 $P-\delta$ 弯矩则往往与一阶弯矩的作用方向相反,而且数值也将小到可以忽略不计的地步。而在能引起侧移的荷载作用下,门式刚架柱的 $P-\Delta$ 弯矩则以柱上、下端截面中为最大。考虑到柱中的一阶弯矩不论是由竖向荷载还是水平荷载引起的,其沿柱高的分布均呈线性,且绝大多数情况下为两个三角形,即其最大值出现在柱顶和柱脚截面,再结合上述二阶弯矩的分布规律,即可作出下列判断:当沿柱高的一阶弯矩分布不是接近矩形时,且当柱的长细度不是非常大时,柱高度范围内各截面中一、二阶弯矩之和均不会超过柱上、下端截面中的一、二阶弯矩之和^[5]。因此,对柱截面起控制作用的最大弯矩仍将发生在柱底和柱顶截面。于是,本文将着重针对左、右两根柱的四个端截面,即图1a中的A、B、C、D四个截面来进行二阶效应分析。

对于图1a所示的门式框架,可变的外部因素计有节点竖向荷载 P 、节点水平荷载 W (本次分析中暂未计入柱上均布水平荷载的影响)以及梁上竖向均布荷载 q ; 可变的内部因素则有梁柱线刚度比以及柱自身的长细度。为了找出以上五个变量对框架柱二阶效应的影响规律,在给定梁、柱截面尺寸及材料强度等级(取常用材料强度等级)的前提下,共对该五种变量的近百种组合进行了计算。其中,柱截面为对称配筋矩形,梁正、负弯矩控制截面均按单筋矩形考虑。在每种变量组合下,均对梁、柱各控制截面的配筋量重新进行调整,使梁截面强度高于对应荷载情况下的柱截面,同时使柱控制截面的强度接近其有相应弯矩同时作用时的最大抗轴压能力,即接近于偏心距增大系数 η 赖以建立的承载能力极限状态。

由于竖向均布荷载 q 和图1a中实线所示的自左向右作用的水平力 W 在 A、B 截面处产生的一阶弯矩方向相反,而在 C、D 截面处产生的一阶弯矩方向相同,因此,在所涉及的变量范围内,当框架左、右两柱考虑水平荷载的可逆向性而取用相同配筋时,起控制作用的总是 C 或 D 截面。

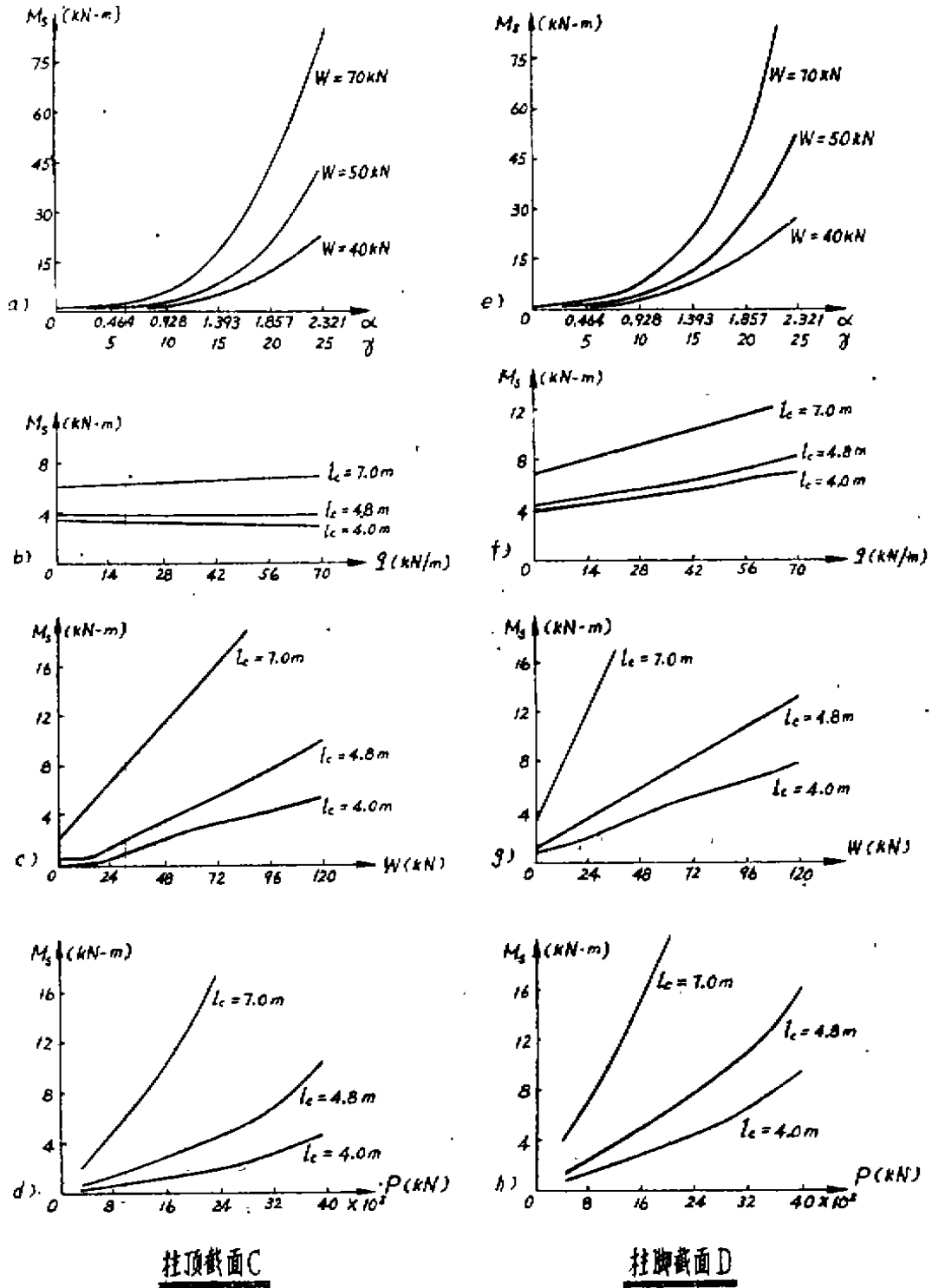
在本次分析中,由给定荷载引起的二阶弯矩是按以下方法确定的。首先按考虑杆件几何非线性进行内力分析,得出各有关截面的非线性总弯矩,即非线性一阶、二阶弯矩之和,再进行同样荷载情况下不考虑杆件几何非线性的内力分析,求得各有关截面中的非线性一阶弯矩,然后在各截面中用非线性总弯矩减去非线性一阶弯矩,即得各自的非线性二阶弯矩。

曾有人建议用非线性总弯矩减去弹性一阶弯矩作为二阶弯矩,认为这样可以在处理二阶效应问题的同时消除掉工程中至今沿用的弹性内力分析所造成的误差。但本文作者认为,这样做不仅使求得的所谓“二阶弯矩”失去了明确的物理意义,而且由于二阶弯矩与弹性一阶弯矩及非线性一阶弯矩之间并无共同规律可言,故若想兼顾二阶弯矩的准确性和消除弹性分析误差这两个任务,必然会顾此失彼。本文作者未采纳这一建议。

通过非线性二阶效应分析,对门式框架可以得出以下定性结论:

- 1) 在门式框架的各个截面中二阶弯矩与一阶弯矩的作用方向在多数截面中相同,但在有些受力情况下的某些截面中,一、二阶弯矩作用方向则相反。
- 2) 二阶弯矩的无侧移部分,即 $P-\delta$ 效应,总是使 A、B、C、D 四个截面的内侧纤维受拉,即在柱顶截面 B、C 中使一阶弯矩减小,而在柱脚 A、D 截面中则使一阶弯矩增大。
- 3) 二阶效应的有侧移部分,即 $P-\Delta$ 效应,在图 1a 实线所示水平力方向下,将使 A、C 截面外侧纤维受拉,使 B、D 截面内侧纤维受拉,即在起控制作用的 C、D 截面中 $P-\Delta$ 弯矩都将增大一阶弯矩。

图 5 给出了在 C、D 这两个对门式框架柱截面设计起控制作用的截面中,用上述非线性



柱顶截面C

柱脚截面D

图5 门式框架C、D截面二阶弯矩随各影响因素的变化规律

分析方法求得的基本上对应于承载能力极限状态的二阶弯矩 M_s 随各主要影响因素的变化规律。总的来看，柱脚截面D中的二阶弯矩较柱顶截面C为大，部分原因是无侧移效应在C截

面处与一阶弯矩反向, 因此, 纯从二阶弯矩的数值来说, 按 D 截面取用总是偏安全的。

从图 5 可以看出, C 、 D 截面的二阶弯矩 M_2 与梁-柱线刚度比 α (按初始弹性刚度计算 $\alpha = i_b/i_c$) 呈明显的非线性关系, 且其关系接近二次抛物线。而横梁竖向均布荷载 q 对 C 截面二阶效应的影响几乎是难以察觉的, 对 D 截面 M_2 的影响虽稍为明显, 但与其它因素相比, 其影响幅度依然有限。考虑到本文计算所取 q 的上限值已大大超过常规设计中偏高的 q 值, 故看来可将 q 对二阶弯矩的影响忽略不计。此外, 计算结果表明, 水平荷载的大小对二阶效应有重要影响。这里值得注意的是, 随着柱顶水平力 W 的增大, A 、 B 截面处由竖向及水平荷载引起的总一阶弯矩将会由负变正, 由于二阶弯矩在这两个截面中的作用方向始终不变, 故 M_2/M 的符号将发生变化, 而且当一阶弯矩较小时, 可能得出很高的 M_2/M 值 (即相当于 η 值相当大)。但由于一阶弯矩很小, 相对于 C 、 D 截面而言, A 、 B 截面的总弯矩依然较小, 故当左右两柱取用同样配筋时, 即使 A 、 B 截面 M_2/M 很高, 对柱截面设计仍不起控制作用。最后, 柱顶垂直荷载 P 的存在是产生二阶效应的主要先决条件。随着 P 的增大, C 、 D 截面的二阶弯矩自然将急剧增大。

综上所述, 在五个主要影响因素中, 除 q 外, 其余因素的影响都是不能忽略的。按上述分析结果, 完全有可能将 C 、 D 截面的二阶弯矩用其余四个影响因素的函数形式表达出来。但考虑到目前规范的习惯做法, 即通过标准柱 η 值的公式来求算框架柱截面中的二阶弯矩, 故仍需根据非线性分析求得的实际二阶弯矩反推出代入 η 值公式后能给出该实际二阶弯矩的框架柱当量长度, 即计算长度 l_0 。

于是, 按实际计算出的 C 、 D 截面中的二阶弯矩, 通过修订后的《混凝土结构设计规范》给出的 η 计算公式^[5]即可求得 C 、 D 截面的 l_0/l_c 。随各主要影响因素的变化规律, 见图 6。从图 6 中可以看出, 经过 η 式的转换, l_0/l_c 随梁-柱线刚度比 α 和柱长细度 γ 变化的规律已变成线性的, 而且, 当保持梁截面及跨度不变, 而通过改变柱的高度来同时调整 α 和 γ 时, 在 α 与 γ 之间就能找到一个固定的换算关系。于是, $\alpha-l_0/l_c$ 关系和 $\gamma-l_0/l_c$ 关系即可用一条曲线表示 (见图 6a 及 6e)。 q 对 l_0/l_c 的影响仍然可以忽略不计。水平力 W 对 l_0/l_c 的影响依然可用直线关系表达, 而 l_0/l_c 与 P 的关系则可用二次抛物线表示。

大量计算结果表明, 就二阶弯矩或 l_0/l_c 的数值而言, 柱脚 D 截面为最大, 但就一、二阶总弯矩及相应轴力所确定的截面配筋而言, 则柱顶截面 C 起控制作用。考虑到 C 、 D 两截面的 M_2 及 l_0/l_c 值相差不大, 故对门式框架柱可建议取 D 截面偏大的 l_0/l_c 值用于设计。这种做法偏于安全, 同时从经济方面也是承担得起的。

根据 D 截面 l_0/l_c 值的计算结果, 可以对柱截面尺寸为 $b \times h = 400 \times 400\text{mm}$, 梁截面尺寸为 $b \times h = 250 \times 550\text{mm}$, 混凝土强度等级为 $C25$, 主筋为 II 级的门式框架给出以下 l_0/l_c 的拟合公式:

$$l_0/l_c = 0.33k_1k_2k_3k_4 \quad (11)$$

式中 l_c ——柱轴线长度;

l_0 ——计算门式框架柱二阶弯矩用的当量标准柱长, 即门式框架柱的计算长度;

k_1 ——与柱顶竖向集中荷载 P 有关的系数, 当 P 以 kN 计时, 取

$$k_1 = 0.568 \times 10^{-7} P^2 - 0.851 \times 10^{-4} P + 0.943$$

k_2 ——与节点水平荷载 W 有关的系数, 当 W 以 kN 计时, 取

$$k_2 = 0.66 + 0.00672W$$

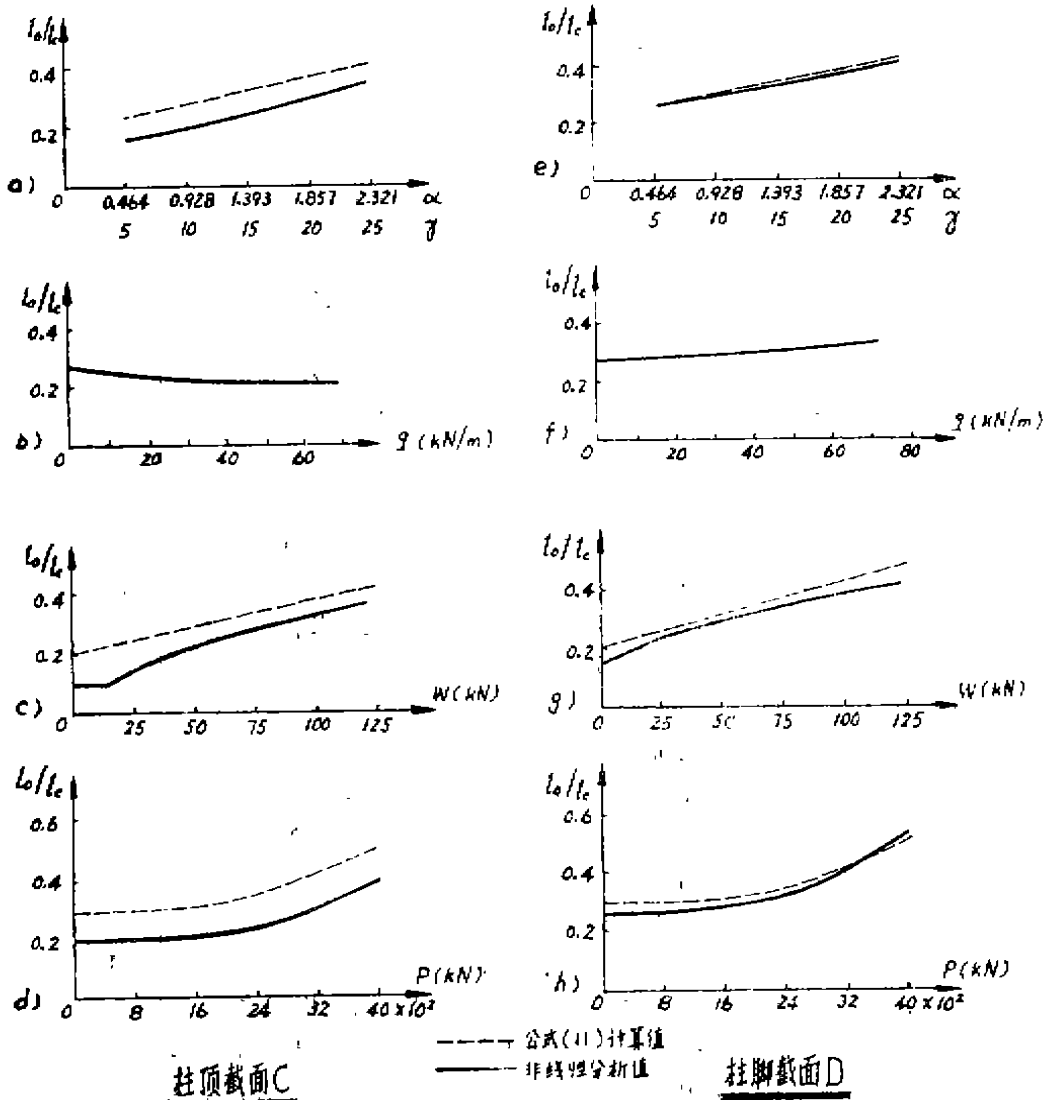


图 6 门式框架 C、D 截面 l_0/l_c 随各影响因素的变化规律

k_3 ——与梁-柱线刚度比 α 有关的系数，取

$$k_3 = 0.737 + 0.254\alpha$$

$\alpha = i_b/i_c$, i_b 、 i_c 分别为梁和柱的线刚度。

k_4 ——与柱长细度 γ 有关的系数，取

$$k_4 = 0.727 + 0.0235\gamma$$

$\gamma = l/h_c$, h_c 为柱截面高度。

由(11)式求得的 l_0/l_c 与由非线性二阶效应分析结果直接反推出的 l_0/l_c 的对比见图 6。从中可以看出，对柱脚 D 截面，两者符合情况良好；而对于柱顶 C 截面，(11)式结果则是偏安全的。这与前文分析结果是一致的。

经与李照民等在文献[4]中给出的有侧移框架 l_0 建议公式相比，可知在 α 及水平荷载不

太大的情况下,非线性分析反推出的 l_0 或用公式(11)计算出的 l_0 均以不同幅度小于文献[4]的建议值。其主要原因在于本文方法考虑了 $P-\delta$ 及 $P-\Delta$ 效应的不同效果,而且消除了文献[4]中一系列假定带来的误差。

3 钢筋混凝土封闭式单元框架柱的二阶效应

在图1b所示的封闭式单元框架中,考虑影响柱二阶效应的主要因素仍为五个,即左右柱顶竖向集中荷载 P (本文计算中暂未考虑左右 P 值不同对二阶效应的影响)、上下横梁竖向均布荷载 q (本文分析中也暂未考虑上下横梁竖向均布荷载取值不同对二阶效应的影响)、柱顶水平集中荷载 W 、梁-柱线刚度比 α (分析中假定上下节点处的 α 相同)以及柱长细度 γ 。

通过对这五种变量的约150种组合进行计算,对封闭式单元框架柱可得出以下结论:

1) 二阶效应的无侧移部分使图1b中A、D截面外侧纤维受拉,B、C截面内侧纤维受拉。这同门式框架的受力情况不完全相同,其原因在于封闭式框架柱下端只受下横梁牵制,对外变为铰接。

2) 在图1b实线所示水平荷载作用下,二阶效应的有侧移部分使A、C截面外侧纤维受拉,B、D截面内侧纤维受拉。这与门式框架的规律基本相同。

3) 在本文所计算的变量范围内,柱控制截面均在柱端。只有当柱长细比极大且作用在结构上的水平荷载较小时,才有可能出现控制截面不在柱端的情况。

在一般情况下,当封闭式单元框架左右柱具有同样配筋时,由于单元框架在由左向右的 W 作用下,左柱中竖向荷载下的一阶弯矩与水平荷载下的一阶弯矩反向,而右柱中这两部分一阶弯矩同向,故对框架柱截面设计起控制作用的仍然是右柱的C、D截面。

图7给出了C、D两个截面中的二阶弯矩与上述各影响因素的关系。从中可以看出, q 的影响继续可以忽略不计, P 、 W 和 γ 的影响趋势与门式框架类似,但 α 对二阶弯矩的影响趋势则与门式框架处相反,这看来主要是柱端约束条件不同所致。

计算结果还表明,在封闭式单元框架中,C截面的一阶弯矩通常较D截面为大,但两个截面的二阶弯矩几乎相等,因此C截面通常为控制截面。从C截面的非线性二阶弯矩经规范修订本的 η 公式反推出了该截面 l_0/l_c 与各影响因素之间的数量关系,见图8。同时可根据计算结果给出C截面 l_0/l_c 的拟合公式:

$$l_0/l_c = 0.33k_1k_2k_3k_4 \quad (11a)$$

该公式的形式与公式(11)相同,只不过其中各系数的取值不同。具体取值为:

k_1 ——与柱顶竖向集中荷载 P 有关的系数,当 P 以kN计时

$$k_1 = 0.1127 \times 10^{-8} P^2 - 0.2343 \times 10^{-3} P + 1.133$$

k_2 ——与节点水平荷载 W 有关的系数,当 W 以kN计时

$$k_2 = 0.4454 + 0.00904W$$

k_3 ——与梁-柱线刚度比 α 有关的系数

$$k_3 = 1.41 - 0.2404\alpha$$

k_4 ——与柱长细度 γ 有关的系数

$$k_4 = 0.6556 + 0.02407\gamma$$

公式(11a)给出的 l_0/l_c 值可以用作封闭式框架柱中各控制截面的通用 l_0/l_c 值。这样

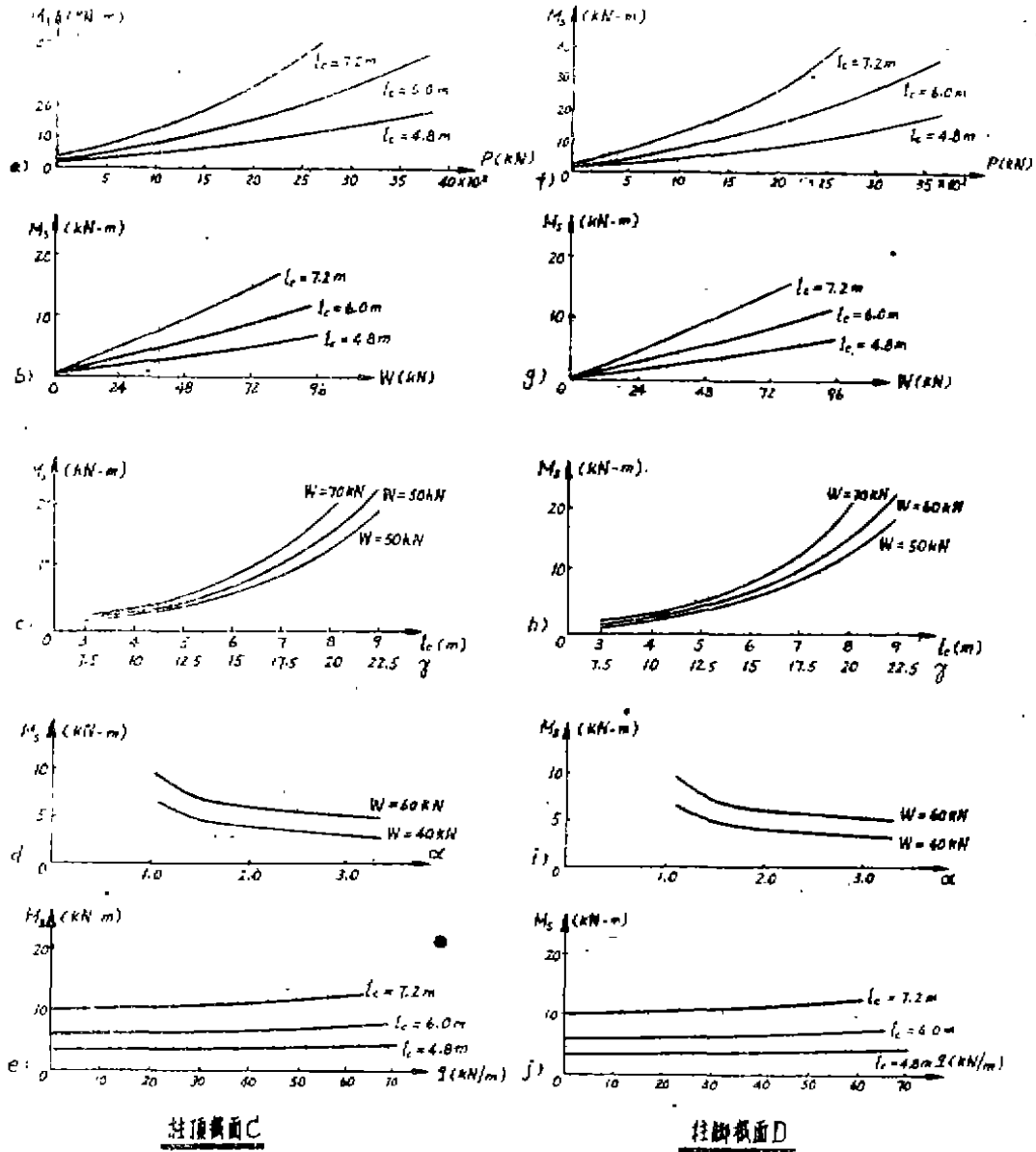


图 7 封闭式单元框架 C、D 截面二阶弯矩随各影响因素的变化规律

做一般是偏于安全的，而且从经济上说也是可以负担的。

在工程设计中可考虑对框架柱的计算长度采用两种取值方案。一种是对各类荷载在无侧移假定下的二阶效应以及在有侧移情况下引起的追加二阶效应分别取用不同的计算长度 l_c 。另一种是像公式 (11) 或 (11a) 那样，取用能反映 $P-\delta$ 效应及 $P-\Delta$ 效应综合效果的计算长度 l_0 。这后一种计算长度可以用拟合公式形式给出，也可以考虑将主要变量分档，并分别给出定值的 l_0 。在取用前一种方法时，可以以 $W = 0$ 时的二阶弯矩作为确定无侧移假定下的计算长度 l_0 的依据；而反映有侧移情况下追加二阶效应的计算长度 $l_{0,1}$ 则可由本文给出的非线性二阶弯矩中减去已知的无侧移二阶弯矩后直接导出。

4 小 结

1) 由于本文的非线性二阶效应分析方法如实地反映了门式框架及封闭式单元框架柱内 $P-\delta$ 效应和 $P-\Delta$ 效应对杆端控制截面二阶弯矩的不同影响,同时纠正了例如Cranston法⁽⁷⁾、李昭民法⁽⁸⁾中所作的各种假定(例如框架上、下各柱段及同层左、右各柱段同时达到失稳临界状态,全部竖向荷载都以节点集中荷载形式出现以及忽略临界状态下柱段挠曲线反弯点之间长度中点与实际控制截面位置的差异和实际框架柱段中的弯矩图形状与标准柱中弯矩图形状的差别等)所带来的误差,故所得的当量标准柱长(即框架柱计算长度)在水平荷载及竖向荷载不太大的情况下,均明显小于现行及修订后的设计规范所规定的框架柱计算长度值。这说明利用非线性二阶效应分析不仅能得出更符合实际受力规律的计算长度值,而且也会给量大面广的钢筋混凝土框架结构设计带来颇为明显的经济效益。

2) 本文求得的非线性二阶弯矩相当于柱相应控制截面达到或接近其最大轴向压力 N_{max} 时的二阶弯矩。这意味着在目前普遍采用弹性方法进行一般工程中框架结构的一阶内力分析,同时采用极限状态法进行截面强度设计的前提下,求算二阶弯矩的极限状态与建立标准柱 η 值计算公式的极限状态是完全一致的,或者说,用本文非线性二阶效应分析结果反推出的计算长度 l_0 是与标准柱 η 值计算公式完全配套的。同样,在进行地震区框架结构的抗震验算时,新修订的建筑物抗震设计规范要求按抗震设防的第一水准进行结构的强度设计,即假定结构仍未进入塑性状态,因此包含地震反应在内的内力分析仍按弹性假定进行,截面强度设计仍按承载能力极限状态进行。这样,本文所求得的计算长度对于第一水准的抗震验算原则上也同样是适用的。至于其中是否需要考虑交变受力过程中残余塑性变形对二阶效应的影响,则应进一步再做工作。

3) 结构进入塑性状态后,已形成塑性铰的截面,其抗弯能力随曲率的增长率将明显降低;同时,未出铰的各控制截面中的二阶效应也将随塑性铰的陆续出现而不断改变其增长规

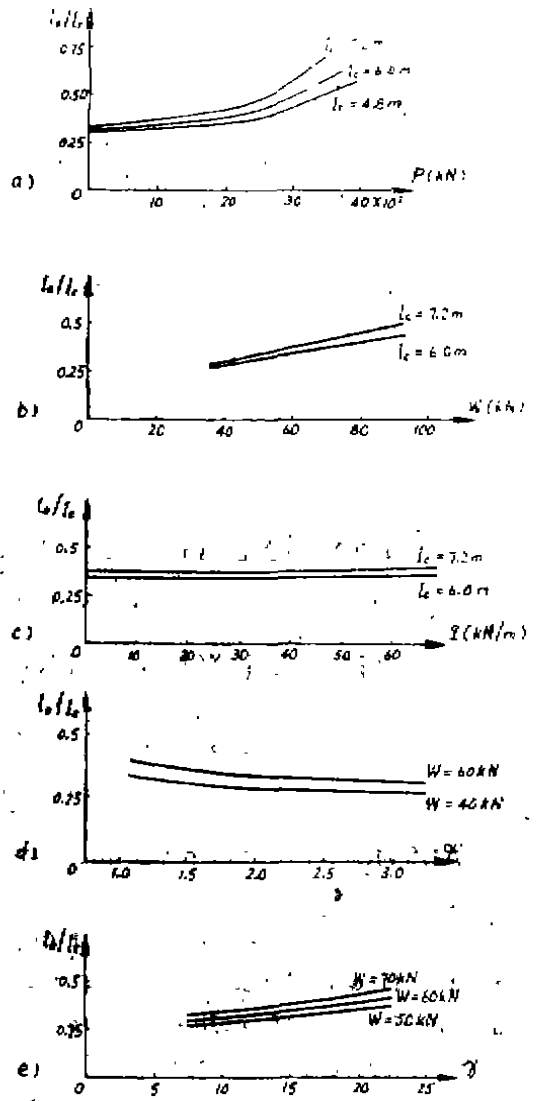


图8 封闭式单元框架C截面 l_0/l_c 随各影响因素的变化规律

律。可以肯定,本文所用由非线性总弯矩减去非线性一阶弯矩而求得非线性二阶弯矩的思路在第一个塑性铰出现后就不再适用,这是因为按非线性总弯矩求得的出铰阶段及顺序与按非线性一阶弯矩求得的出铰阶段及顺序在很多情况下将是不一致的。因此,框架出铰后的二阶效应问题需另寻其它思路和方法来分析。

目前,多层多跨框架的非线性二阶效应分析工作以及出铰后框架柱的非线性二阶效应分析工作正在进行中,有关研究成果将另文介绍。

参 考 文 献

- 1 汪强. 钢筋混凝土框架柱的非线性二阶分析方法. 重庆建筑工程学院硕士论文, 1987, 6
- 2 刘少勇. 钢筋混凝土单元封闭框架二阶效应分析. 重庆建筑工程学院硕士论文, 1988, 6
- 3 白绍良. 钢筋混凝土框架柱的二阶效应计算体系. 重庆建筑工程学院学报, 1989, 6
- 4 钢筋混凝土结构与构造——85年设计规范背景资料汇编. 中国建筑科学研究院, 1985, 7
- 5 CEB/FIP Manual of Buckling and Instability, The Construction Press, Lancaster London, New York, 1978
- 6 中华人民共和国国家标准混凝土结构设计规范. GBJ 10-89
- 7 W.B.Cranston. Analysis and Design of Reinforced Concrete Columns. Cement and Concrete Association, Research Report No. 20, Paper 40.020, London, 1972

(编辑: 徐维森)

NONLINEAR SECOND-ORDER ANALYSIS OF COLUMNS IN REINFORCED CONCRETE PORTAL FRAME ELEMENT AND CLOSED FRAME ELEMENT

Bai Shaoliang Wang Qiang Liu Shaoyong

(Department of Civil Engineering)

ABSTRACT This paper presents a basic computer method and its procedures for nonlinear second-order effect analysis of reinforced concrete frame. The most essential portal frame element and closed frame element are systematically analysed for the effects of vertical and horizontal loads, stiffness ratio of beam and column and slenderness of column upon the second-order moment in critical sections of the columns. On the basis of the formula of eccentricity magnifier η in the newly-revised Concrete Structure Design Code, the effective length l_0 of column, which can reflect rather accurately the second-order moment in the critical sections in the two types of frame columns stated above, is presented and the variation law of l_0 with the influential factors as well as a fitting formula for l_0 given.

KEY WORDS reinforced concrete, frame, column, second-order effect, effective length