

文章编号:1000-582X(2006)09-0130-04

无侧移单元封闭框架二阶效应规律的解析解*

朱占友,刘毅,李战平,白绍良

(重庆大学土木工程学院,重庆 400030)

摘要:为了进一步论证框架柱 $P-\delta$ 效应规律,以无侧移单元封闭框架为研究的出发点,回顾了由数值分析结果总结出的无侧移单元封闭框架柱二阶效应规律,提出了二阶效应分析中的二阶内力方程和基于转角位移方程的附加位移法,揭示了框架整体二阶效应对框架内力的影响规律,并得到无侧移单元封闭框架二阶效应的解析解,解析法得出的无侧移单元封闭框架柱二阶效应规律与数值分析结果协调,从理论上证明了无侧移单元封闭框架柱二阶效应规律的严密性.

关键词: $P-\delta$ 效应,无侧移单元封闭框架,附加位移法

中图分类号:TU311.4

文献标识码:A

试验和分析表明,框架结构中的二阶效应应分为竖向荷载在已产生侧移的框架中引起的二阶效应($P-\Delta$ 效应)和各杆件轴力(主要是轴压力)在产生了挠曲变形的各单杆中引起的二阶效应($P-\delta$ 效应).有侧移框架中要同时考虑 $P-\Delta$ 效应和 $P-\delta$ 效应,无侧移框架中只需考虑 $P-\delta$ 效应^[1-2].无侧移框架的 $P-\delta$ 效应规律也适用于有侧移框架^[3-4].单元封闭框架是框架的构成单元,力学规律具有代表性,可以作为无侧移框架二阶效应规律研究的出发点.文献[5]根据数值分析结果对无侧移单元封闭框架柱 $P-\delta$ 效应规律作了较系统的阐述.基于小变形假设,通过附加位移法,可得到无侧移单元封闭框架 $P-\delta$ 效应的解析解,从理论上论证了该文献提出的相关规律.

1 无侧移单元封闭框架柱 $P-\delta$ 效应规律

图1中无侧移单元封闭框架上下横梁三分点处分别作用图示对称集中荷载,保持上部集中力 P_1 不变,通过改变下部集中力 P_2 来调整柱中弯矩分布,使柱 AB 下端与上端一阶弯矩比值 λ_1 从1变到-1.图2反映了在不同弯矩比 λ_1 下 AB 柱 $P-\delta$ 效应对一阶弯矩的影响,其中实直线表示一阶弯矩,虚曲线表示二阶分析弯矩.

从图2可以发现无侧移单元封闭框架柱 $P-\delta$ 效应规律^[5]:对于柱端弯矩,当柱上下端一阶弯矩同号时,二阶效应减小柱端一阶弯矩如图2(a),2(b);当柱上下端一阶弯矩反号时,绝对值较大的 B 端(大端)一阶弯矩总被二阶效应减小,绝对值较小的 A 端(小

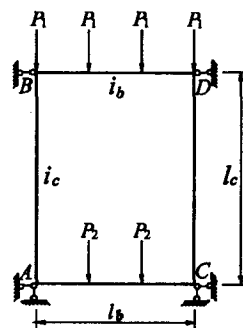


图1 无侧移单元封闭框架模型

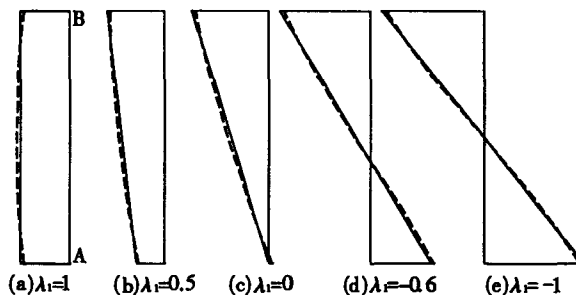


图2 框架柱 $P-\delta$ 效应规律

端)一阶弯矩在弯矩比 λ_1 接近-1时也被二阶效应减小(如图2(e)),其他情况则被增大(如图2(d)).而且通过计算进一步发现,对于柱中弯矩,若柱长细比和轴压力不是很大,则只有在柱上下端弯矩同号,且一阶弯矩比 λ_1 接近1时,二阶效应可能使柱中弯矩大于大端弯矩,甚至大于大端一阶弯矩;若柱长细比或轴压力很大,在柱上下端弯矩反号时,二阶效应也可能使柱中弯矩大于大端弯矩,甚至大于大端一阶弯矩.

* 收稿日期:2006-04-12

作者简介:朱占友(1980-),男,重庆人,重庆大学硕士研究生,主要从事钢筋混凝土结构的研究.

2 二阶效应分析中的附加位移法

2.1 考虑轴力影响的等截面直杆转角位移方程

以杆件变形后的位形为平衡位置, 基于小变形假设可推导出考虑轴力影响的等截面直杆转角位移方程^[6], 这是传统结构力学中转角位移方程的推广. 图3表示等截面直杆 AB 受力和变形情况, 图中力和位移方向均为正向, 其中 θ_{AB} 为直杆相对侧移角.

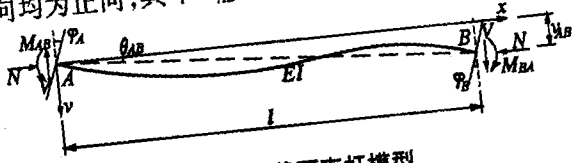


图3 等截面直杆模型

当直杆两端固支时, 转角位移方程为

$$\left. \begin{aligned} M_{AB} &= -i[S_{ii}\varphi_A + S_{ij}\varphi_B - (S_{ii} + S_{ij})\theta_{AB}] \\ M_{BA} &= i[S_{ij}\varphi_A + S_{ii}\varphi_B - (S_{ii} + S_{ij})\theta_{AB}] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

杆中任意截面弯矩为

$$M(x) = -i[S_{ii}\varphi_A + S_{ij}\varphi_B - (S_{ii} + S_{ij})\theta_{AB}] \cos kx + [(S_{ij} \operatorname{coseck}l + S_{ii} \cot k l)\varphi_A + (S_{ii} \operatorname{coseck}l + S_{ij} \cot k l)\varphi_B - (S_{ii} + S_{ij})(\operatorname{coseck}l + \cot k l)\theta_{AB}] \sin kx. \quad (2)$$

式(1), (2)中 S_{ii}, S_{ij} 分别为近端和远端分配系数, i 为直杆线刚度.

$$\left. \begin{aligned} S_{ii} &= \frac{k l \sin k l - (k l)^2 \operatorname{coseck}l}{2 - 2 \operatorname{coseck}l - k l \sin k l} \\ S_{ij} &= \frac{(k l)^2 - k l \sin k l}{2 - 2 \operatorname{coseck}l - k l \sin k l} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上面各式中 $k^2 = N/EI$, kl 是反映直杆长细度和所受轴力大小的综合指标.

$$kl = l \sqrt{\frac{N}{EI}} = \frac{l}{\rho} \sqrt{\frac{N}{EA}} = \pi \sqrt{\frac{N}{N_E}} \quad (4)$$

式(4)中 ρ 为直杆横截面回转半径, A 为横截面面积, N_E 为欧拉临界力. 当轴力趋于零时, 式(1)将退化为不考虑轴力影响的转角位移方程, 近端和远端分配系数 S_{ii} 和 S_{ij} 分别等于 4 和 2, 分配系数的变化规律参见图 4.

2.2 二阶内力方程

框架结构实际平衡状态应以结构变形后的位形为参考, 考虑二阶效应分析得出的框架内力和变形状态是真实平衡态(用上标 II 表示), 而一阶分析得出的状态是近似平衡态(用上标 I 表示). 真实平衡态下框架构件各截面内力和位移相对于一阶分析内力和位移的增量分别称为二阶附加内力(二阶内力)和二阶附加位移(附加位移), 见式(5)和(6). 式(5)中 F_{in}^I 可分别表示构件各截面的弯矩、剪力和轴力; 式(6)中 D_{in}^I 可分别表示沿构件轴向位移, 侧向位移和截面转动.

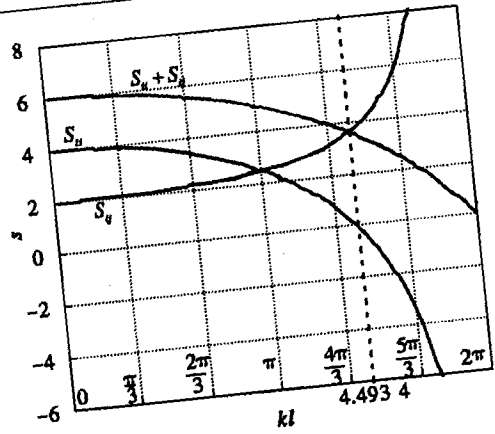


图4 分配系数随 kl 的变化规律

$$\Delta F_{in} = F_{in}^{II} - F_{in}^I. \quad (5)$$

$$\Delta D_{in} = D_{in}^{II} - D_{in}^I. \quad (6)$$

假设对处于真实平衡态的框架各节点施加与节点附加位移等大反向的位移荷载, 框架将达到新的平衡状态, 称为约束平衡态(用上标 F 表示). 在约束平衡态下, 各节点位移与一阶分析位移相同, 但由于二阶效应的影响, 框架构件各截面内力和变形将不同于一阶分析结果, 可以通过考虑轴力影响的转角位移方程求出. 如果不考虑框架梁的轴力影响, 梁各截面内力和变形仍和一阶分析结果相同. 由于框架各节点一阶内力和节点荷载相互平衡, 但在约束平衡态下, 梁柱端内力发生改变, 而节点荷载不变, 因此节点上会产生不平衡力, 于是把约束平衡态下框架构件各截面内力对于一阶内力的增量称为约束附加内力(用上标 F 表示), 见式(7).

$$\Delta F_{in}^F = F_{in}^F - F_{in}^I. \quad (7)$$

框架约束平衡态下在各节点上施加相应的附加位移荷载, 各节点将达到真实位移状态, 整个结构也应达到真实的内力和变形状态. 将真实平衡态下框架构件各截面内力相对于约束平衡态下内力的增量称为位移附加内力(用上标 D 表示), 见式(8).

$$\Delta F_{in}^D = F_{in}^{II} - F_{in}^F. \quad (8)$$

由式(5)、(7)和(8), 可得二阶内力方程 $\Delta F_{in} = (F_{in}^{II} - F_{in}^F) + (F_{in}^F - F_{in}^I) = \Delta F_{in}^D + \Delta F_{in}^F. \quad (9)$

上式表明: 由于二阶效应影响, 框架结构真实内力相对于一阶内力发生了重分配, 结构构件的二阶内力等于约束附加内力与位移附加内力之和. 当忽略框架梁二阶效应时, 框架梁的约束附加内力为零, 因此框架整体二阶效应对框架内力的影响规律为: 框架梁的二阶内力等于位移附加内力, 框架柱的二阶内力等于约束附加内力与位移附加内力之和.

2.3 约束附加弯矩和位移附加弯矩

不妨假设图3中的等截面直杆模型处于约束平衡态, 根据约束附加内力定义, 可得杆端约束附加弯矩

$$\Delta M_{AB}^F = M_{AB}^F - M_{AB}^I = i[(4 - S_{ii}^I)\varphi_A' + (2 - S_{ij}^I)\varphi_B' - (6 - S_{ii}^I - S_{ij}^I)\theta_{AB}'] \quad (10)$$

$$\Delta M_{BA}^F = M_{BA}^F - M_{BA}^I = -i[(2 - S_{ij}^I)\varphi_A' + (4 - S_{ii}^I)\varphi_B' - (6 - S_{ii}^I - S_{ij}^I)\theta_{AB}'] \quad (11)$$

对无侧移框架柱,式(10)和(11)中相对侧移角 θ_{AB}' 为零.约束附加剪力可类似求得,约束附加轴力为零.

对式(1)求全微分,可得杆端位移附加弯矩

$$\begin{aligned} \Delta M_{AB}^D &= M_{AB}^{II} - M_{AB}^F \approx \\ & \left(\frac{\partial M_{AB}}{\partial \varphi_A}\right)'(\varphi_A'' - \varphi_A') + \left(\frac{\partial M_{AB}}{\partial \varphi_B}\right)'(\varphi_B'' - \varphi_B') + \\ & \left(\frac{\partial M_{AB}}{\partial \theta_{AB}}\right)'(\theta_{AB}'' - \theta_{AB}') + \left(\frac{\partial M_{AB}}{\partial N}\right)'(N'' - N^F) = \\ & -i[S_{ii}^I\Delta\varphi_A + S_{ij}^I\Delta\varphi_B - (S_{ii}^I + S_{ij}^I)\Delta\theta_{AB}] - \\ & i[(\varphi_A' - \theta_{AB}')\left(\frac{dS_{ii}^I}{dN}\right)' + (\varphi_B' - \theta_{AB}')\left(\frac{dS_{ij}^I}{dN}\right)']\Delta N. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta M_{BA}^D &= M_{BA}^{II} - M_{BA}^F \approx \\ & i[S_{ij}^I\Delta\varphi_A + S_{ii}^I\Delta\varphi_B - (S_{ii}^I + S_{ij}^I)\Delta\theta_{AB}] + \\ & i[(\varphi_A' - \theta_{AB}')\left(\frac{dS_{ij}^I}{dN}\right)' + (\varphi_B' - \theta_{AB}')\left(\frac{dS_{ii}^I}{dN}\right)']\Delta N. \end{aligned} \quad (13)$$

当约束平衡态与真实平衡态下杆轴力相等时,式(12)和(13)中 ΔN 为零,而且式中等号化为等号.

根据式(9)~(13)以及框架节点平衡条件,建立以节点附加位移为未知量的线性方程组,将节点附加位移求出后,可进一步求解框架的二阶内力,这就是二阶效应分析中的附加位移法.下面通过附加位移法求得无侧移单元封闭框架二阶效应的解析解.

3 无侧移单元封闭框架二阶效应规律

3.1 二阶效应对柱端弯矩的影响

计算简图如图1所示,柱AB和CD轴力恒定,梁AC和BD轴力为零.设A、B节点转角分别为 φ_A 和 φ_B ,梁柱线刚度分别为 i_b 和 i_c .弯矩正方向规定:使柱左侧受拉的弯矩方向为柱弯矩正向,使梁上部受拉的弯矩方向为梁弯矩正向.

根据式(1)和(7),可得梁端约束附加弯矩为零,柱端约束附加弯矩为

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_{AB}^F &= -(S_{ii}^I - 4)i_c\varphi_A' - (S_{ij}^I - 2)i_c\varphi_B' \\ \Delta M_{BA}^F &= (S_{ij}^I - 2)i_c\varphi_A' + (S_{ii}^I - 4)i_c\varphi_B' \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

根据式(9)、(12)和(13),又因为梁端约束附加弯矩为零,柱轴力恒定,可得梁端二阶弯矩为

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_{AC} &= \Delta M_{AC}^D = -2i_b\Delta\varphi_A \\ \Delta M_{BD} &= \Delta M_{BD}^D = -2i_b\Delta\varphi_B \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

柱端二阶弯矩为

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_{AB} &= \Delta M_{AB}^F - i_c(S_{ii}^I\Delta\varphi_A + S_{ij}^I\Delta\varphi_B) \\ \Delta M_{BA} &= \Delta M_{BA}^F + i_c(S_{ij}^I\Delta\varphi_A + S_{ii}^I\Delta\varphi_B) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由节点A、B的平衡条件建立方程组

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_{AC} + \Delta M_{AB} &= 0 \\ \Delta M_{BD} - \Delta M_{BA} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

代入式(13)和(14),并化简得

$$\left. \begin{aligned} (2i_b + S_{ii}^I i_c)\Delta\varphi_A + S_{ij}^I i_c\Delta\varphi_B &= \Delta M_{AB}^F \\ S_{ij}^I i_c\Delta\varphi_A + (2i_b + S_{ii}^I i_c)\Delta\varphi_B &= -\Delta M_{BA}^F \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

该方程组的解为

$$\Delta\varphi_A = \frac{(2i_b + S_{ii}^I i_c)\Delta M_{AB}^F + S_{ij}^I i_c\Delta M_{BA}^F}{(2i_b + S_{ii}^I i_c)^2 - S_{ij}^I i_c^2}, \quad (19)$$

$$\Delta\varphi_B = S_{ij}^I i_c\Delta M_{BA}^F + \frac{(2i_b + S_{ii}^I i_c)\Delta M_{AB}^F}{(2i_b + S_{ii}^I i_c)^2 - S_{ij}^I i_c^2}, \quad (20)$$

1) 对于柱A端

① 当 $\Delta\varphi_A = 0$ 时,将柱端约束附加弯矩表达式(14)代入式(19)可得一阶转角比 η_1 满足

$$\eta_1 = \frac{\varphi_A'}{\varphi_B'} = \frac{(2i_b + S_{ii}^I i_c)(S_{ij}^I - 2) - S_{ij}^I i_c(S_{ii}^I - 4)}{S_{ij}^I i_c(S_{ij}^I - 2) - (2i_b + S_{ii}^I i_c)(S_{ii}^I - 4)}. \quad (21)$$

此时令 $\eta_c = \eta_1$,称为临界转角比.根据转角位移方程得一阶弯矩比 λ_1 应满足

$$\lambda_1 = \frac{M_{AB}^I}{M_{BA}^I} = -\frac{1 + 2\eta_c}{2 + \eta_c}, \quad (22)$$

由于节点A的转角不会被二阶效应改变,根据式(15)和(17),可得

$$\Delta M_{AC} = \Delta M_{AB} = 0. \quad (23)$$

即与节点A相连的梁柱端弯矩也不会被二阶效应改变.此时,一阶弯矩比 λ_1 随梁柱线刚度比和 kl 的变化情况见图5.从图中可发现对于常规结构柱($0 < kl \leq \pi$)在一阶端弯矩反号,弯矩比 λ_1 大概在 $-0.9 \sim -0.7$ 之间时,二阶效应不会改变小端弯矩.

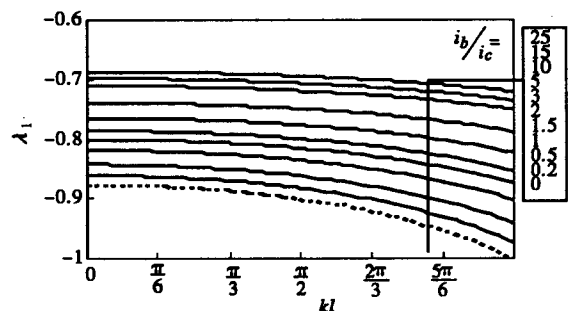


图5 临界一阶端弯矩比

② 当 $\Delta\varphi_A < 0$ 时,可得 $-1 \leq \eta_1 < \eta_c$,即 λ_1 满足 $-(1 + 2\eta_c)/(2 + \eta_c) < \lambda_1 \leq 1$.此时,节点A有逆时针附加转角,梁A端产生正向二阶弯矩,柱A端产生负方向二阶弯矩.当 $0 < \lambda_1 \leq 1$ 时,柱A端一阶弯矩为正,

二阶效应减小柱A端一阶弯矩,若柱A端一阶弯矩较小,二阶效应可能使端弯矩减为零,甚至反号,如图2(a)、2(b);当 $\lambda_1 \leq 0$ 时,二阶效应增大柱A端一阶弯矩,如图2(c)、2(d)。

③当 $\Delta\varphi_A > 0$ 时,可得 $\eta_c < \eta_1 \leq 1$,即 λ_1 满足 $-1 \leq \lambda_1 < -(1+2\eta_c)/(2+\eta_c)$ 。此时,节点A有顺时针附加转角,梁A端产生负方向二阶弯矩,柱A端产生正向二阶弯矩。柱A端一阶弯矩为负,二阶效应减小柱A端弯矩,如图2(e)。

2) 对于柱B端

同样将式(14)代入式(20)可得

$$\Delta\varphi_B = C_A\varphi_A' + C_B\varphi_B' \quad (24)$$

其中,

$$C_A = \frac{-[2i_b + S_{ii}'i_c](s_{ij}' - 2) + S_{ij}'i_c(4 - S_{ii}')i_c}{(2i_b + S_{ii}'i_c)^2 - S_{ij}'^2i_c^2}$$

$$C_B = \frac{[2i_b + S_{ii}'i_c](4 - S_{ii}') + S_{ij}'i_c(S_{ij}' - 2)i_c}{(2i_b + S_{ii}'i_c)^2 - S_{ij}'^2i_c^2}$$

当 $0 < kl \leq \pi$ 时,根据图4,有 $4 - S_{ii}' > S_{ij}' - 2$,又因为 $\varphi_B' \geq \varphi_A'$, $2i_b + S_{ii}'i_c > S_{ij}'i_c$,可得 $\Delta\varphi_B > 0$ 。

可见,节点B的附加转角方向始终是顺时针,根据式(17),与节点B相连的梁柱端产生沿各自负方向的二阶附加弯矩,柱B端的一阶弯矩将被减小,如图2。

3.2 二阶效应对柱中弯矩的影响

在真实平衡态下,根据式(2)可得柱AB任意截面x处(原点为节点A)的弯矩,用考虑二阶效应的柱端弯矩表示^[6]

$$M_c''(x) = M_{AB}'' \cos kx + (M_{BA}'' \operatorname{cosec} kl - M_{AB}'' \cot kl) \sin kx. \quad (25)$$

产生最大弯矩的条件为

$$\frac{dM_c''(x)}{dx} = 0. \quad (26)$$

由式(26)可求得 x_m 处有最大弯矩 M_{\max}'' 。又 $0 \leq kx_m \leq kl \leq \pi$,则 $\cot kx_m \geq \cot kl$,又根据式(26),得

$$\frac{\lambda_2 \sin kl}{1 - \lambda_2 \cos kl} = \cot kx_m \geq \cot kl, \quad (27)$$

其中 λ_2 为考虑二阶效应的柱A端与B端弯矩比。因为 $0 \leq |\lambda_2| \leq 1$,可得 $\lambda_2 \geq \cos kl$ 。

根据式(25)和式(26),得

$$M_{\max}'' = M_c''(x_m) = A_m |M_{BA}''|. \quad (28)$$

$$\text{其中, } A_m = \frac{\sqrt{\lambda_2^2 - 2\lambda_2 \cos kl + 1}}{\sin kl}.$$

A_m 称为弯矩放大系数,即柱中最大弯矩与考虑二阶效应的大端弯矩的比值。

讨论:

1) 当 $\lambda_2 > \cos kl$ 时,此时在柱中

$$x_m = \frac{1}{k} \cot^{-1} \frac{\lambda_2 \sin kl}{1 - \lambda_2 \cos kl} \quad (29)$$

有最大弯矩。当 $\cos kl \geq 0$,即 $0 < kl \leq \pi/2$ 时,只有上下端弯矩同号,才会出现柱中弯矩大于大端弯矩的情况;当 $kl > \pi/2$ 时,即使柱上下端弯矩异号,跨中弯矩也可能大于大端弯矩,但这种情况在常规结构中罕见,如图6中细实线区域。

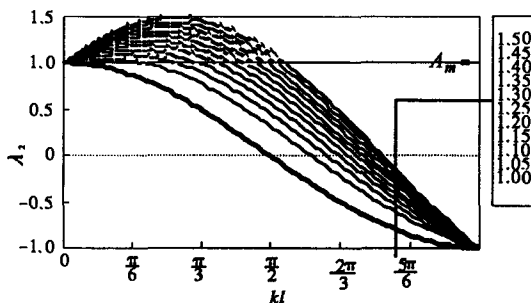


图6 柱中弯矩放大系数

2) 当 $\lambda_2 = \cos kl$ 时, $x_m = l, A_m = 1$,此时柱B端弯矩恰为最大弯矩,如图6中粗实线区域。

3) 当 $-1 \leq \lambda_2 < \cos kl$ 时,式(26)无合理解,此时柱B端弯矩为最大弯矩。

4 结语

回顾了由数值分析结果总结出的无侧移单元封闭框架柱二阶效应规律,提出了二阶效应分析中的二阶内力方程和基于转角位移方程的附加位移法,揭示了框架整体二阶效应对框架内力的影响规律,并得到无侧移单元封闭框架二阶效应的解析解。解析法得出的无侧移单元封闭框架柱二阶效应规律与数值分析结果协调,从理论上证明了无侧移单元封闭框架柱二阶效应规律严密。

参考文献:

- [1] 白绍良,魏巍,刘毅,等. 考虑钢筋混凝土框架整体二阶效应规律的改进 $\eta-l_0$ 法[J]. 重庆建筑大学学报,2000, 22(增刊):1-8.
- [2] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003:90-100.
- [3] 王志军. 钢筋混凝土铰支柱和框架柱二阶效应及稳定问题研究[D]. 重庆:重庆大学,1996.
- [4] 魏巍. 考虑非弹性及二阶效应特征的钢筋混凝土框架柱的强度问题与稳定问题[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [5] 高晓莉. 钢筋混凝土框架柱二阶效应实用设计方法研究[D]. 重庆:重庆大学,1996.
- [6] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京:科学出版社, 2001:80-87. (下转第143页)

- [26] 张鹏,周琪. 低氧条件下完全混合系统同时硝化和反硝化的试验研究[J]. 上海环境科学,2003,22(11):755-759.
- [27] 张蔚萍,陈建中. 低碳高浓度含氮废水的生物脱氮技术[J]. 环境保护,2003,6:20-21.44.
- [28] 李勇智,彭永臻,王淑莹,等. 采用序批式反应器短程生物脱氮工艺处理高氨氮制药废水[J]. 现代化工,2003,23(增刊):163-166.
- [29] HYUNGSEOK YOO, KYU-Hong AHN, HYUNG-JIB Lee. Nitrogen Removal from Synthetic Wastewater by Simultaneous Nitrification and Denitrification(SND) via Nitrite in an Intermittently-aerated Reactor[J]. Wat Res, 1999, 33(1): 145-154.
- [30] 高大文, 彭永臻, 潘威. SBR法短程硝化-反硝化生物脱氮工艺的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(6):1-4.
- [31] 陈立伟,蔡天明,李顺鹏. VE生产废水的短程硝化反硝化研究[J]. 环境工程,2004,22(4):7-9.
- [32] JETTEN MSMI. Towards a more Sustainable Municipal Wastewater Treatment System[J]. Wat Sci Tech,1997,35(9):171-180.
- [33] STRAOUS M. Ammonium Removal from Concentrated Waste Streams with the Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Process in Different Configurations [J]. Wat Res, 1997,31:1 955-1 962.
- [34] 王建龙. 生物脱氮新工艺及其技术原理[J]. 中国给水排水,2000,16(2):25-28.
- [35] 杨岚,杨景亮,李再兴,等. 厌氧氨氧化技术研究进展[J]. 河北化工,2004,3:54-56.
- [36] 胡宝兰. 新兴生物脱氮技术工艺的研究[J]. 应用与环境生物学报,1999,5(4):68-73.

Advance in New Technology of Biological Nutrient Removal

TANG Qi^{1,2}

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. Science College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: General situation studying on new technology of biological nutrient removal is summarized, such as the principle of denitrifying dephosphataion and factors affecting it, such as pH, DO, SRT, MLSS etc. The principle of simultaneous nitrification and denitrification and factors affecting it are given, such as carbon source, DO, the property of activated sludge ect. The principle of shortcut nitrification -denitrification and factors affecting it is also given such as temperature, pH, the concentration of ammonia, DO etc. The principle of anaerobic ammonium oxidation and factors affecting it is proposed such as stayer, pH, temperature etc. The technics and its peculiarity of these new technology of biological nutrient removal is commented.

Key words: biological nutrient removal; denitrifying dephosphataion; simultaneous nitrification and denitrification; shortcut nitrification - denitrification; anaerobic ammonium oxidation

(编辑 陈移峰)

(上接第133页)

Analytic Solution of Second Order Effects Regular Pattern in Non-Sway Closed Cell Frame

ZHU Zhan-you, LIU Yi, LI Zhan-ping, BAI Shao-liang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The regular pattern of second order effects according to numerical analysis results in non-sway closed cell frame columns is reviewed. The second order internal force equation and additional displacement method based on the turn-angle equation are provided in second order effects analysis. The analytic solution of second order effects in non-sway closed cell frames is solved by this method, which has proved that the regular pattern of second order effects in non-sway closed cell frame columns is exact.

Key words: P- δ effects, Non-sway closed cell frames, additional displacement method

(编辑 姚飞)