DOI:10.19701/j.jzjg.2017.03.007

论高层建筑结构重力二阶效应

许 璇[1]， 曾庆立[1]， 魏 琏[1,2]
(1 深圳市力鹏工程结构技术有限公司，深圳 518034;
2 深圳市力鹏建筑结构设计事务所，深圳 518034)

[摘要] 详细介绍了重力二阶效应的计算方法，提出了二阶效应比的概念，结合9个实际工程案例二阶效应比的分析，指出了现有方法存在的问题。现有程序容易实现 P-Δ 效应的计算，建议一般的高层建筑结构均宜考虑 P-Δ 效应的影响，不规则高层建筑结构及超高层结构应考虑 P-Δ 效应的影响。

[关键词] 重力二阶效应; P-Δ 贡献; 二阶效应比; 刚重比
中图分类号: TU318 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2017)03-0034-06

Discussion about second-order effects of gravity loading in high-rise building

Xu Xuan[1], Zeng Qingli[1], Wei Lian[1,2]
(1 Shenzhen Li Peng Structural Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China;
2 Shenzhen Li Peng Building Structure Design Institute, Shenzhen 518034, China)

Abstract: The method of considering second-order effects of gravity loading was described in detail, then a new coefficient named as "ratio of second-order effects (RSE)" was proposed. Based on analysis of RSE of 9 practical projects and discussion of current methods of considering second-order effects of gravity loading, several problems of current methods were pointed out. It is very easy to consider P-Δ effects by present building design programs. Thus it is suggested that P-Δ effects should better be considered in all regular high-rise building structures, and should be considered in all irregular and super high-rise structures.

Keywords: second-order effects of gravity loading; P-Δ contribution; ratio of second-order effect; stiffness gravity ratio

0 前言

高层建筑在水平荷载作用下，产生一定的水平位移，由于结构上同时存在重力荷载的作用，基于二阶理论分析，结构的内力和位移会有不同程度的增加，此即重力二阶效应。随着我国经济及文化的快速发展，国内高层建筑的造型越来越奇特，此类高层建筑往往具有结构体型复杂、层数多、竖向荷载大、抗侧刚度较小等特点，在风荷载、地震作用甚至自重的作用下，重力二阶效应对此类结构的内力和位移的影响应需引起工程界的关注。

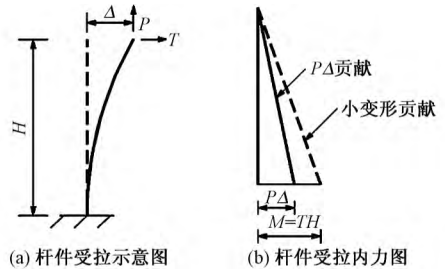
本文详细介绍了重力二阶效应的计算方法，提出了二阶效应比的概念，结合9个实际工程案例二阶效应比的分析，并通过总结现行考虑重力二阶效应的方法，指出了现有方法存在的问题，提出了设计中考虑重力二阶效应的建议。

1 ETABS 程序重力二阶效应分析的实现方法

重力二阶效应包括两种类型，一种是由于结构整体的侧移引起的 P-Δ 贡献，另外一种是由于杆件的变形引起的 P-δ 贡献[1]。一般而言，由整体侧移引起的 P-Δ 贡献是重要的，但对于细柔的受压杆件 P-δ 贡献亦不能忽视。本文主要研究结构整体侧移引起的 P-Δ 效应，也介绍了 P-δ 贡献的考虑方法。此处以 ETABS 程序为例，说明程序在计算分析模型时是如何计算重力二阶效应。

1.1 几何刚度矩阵

如图1(a)所示，杆件受拉力 P 和横向力 T，在横向力 T 作用下产生位移 Δ，与小变形理论相比较，如图1(b)所示，当考虑重力二阶效应的影响时，拉力 P 会使杆件的底部弯矩减小 $P\Delta$，相当于拉力使杆件的侧向刚度增加。



(a) 杆件受拉示意图 (b) 杆件受拉内力图

图1 杆件受拉示意图及内力图

如图2(a)所示，杆件受压力 P 和横向力 T，在横向力 T 作用下产生位移 Δ，同样地，与小变形理论相比较，如图2(b)所示，当考虑重力二阶效应的影响时，压力 P 会使杆件的底部弯矩增加 $P\Delta$，相当于压力使杆件的侧向刚度减小。

作者简介: 许璇，硕士，工程师，Email: depporah@163.com。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

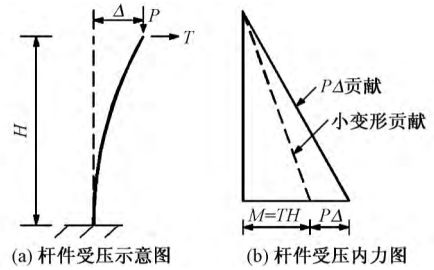


图 2　杆件受压示意图及内力图

如上所述，重力二阶效应可以认为是拉力使杆件的侧向刚度增加，压力使杆件侧向刚度减小，这种特性是由于结构的几何刚度改变所引起[2]。程序考虑重力二阶效应的方法一般是在初始弹性刚度矩阵中引入几何刚度矩阵。图 3 所示的杆件长度为 L，两端有初始拉力 T。

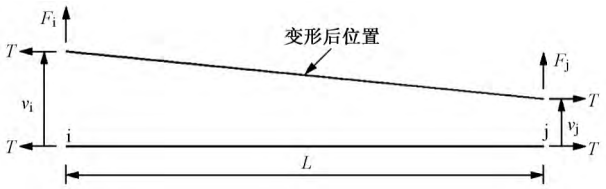


图 3　几何刚度示意图

若杆件的两端有不同的侧向位移 v_i，v_j，则必定产生附加力 F_i，F_j 使得杆件在变形的位置达到平衡，这里假定所有向上的力和位移为正。于是可以通过矩阵方程的方法写出变形后的平衡方程，如下式所示：

$$\begin{bmatrix} F_i \\ F_j \end{bmatrix} = \frac{T}{L}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix} \tag{1}$$

或者用符号表示为：

$$F_G = \boldsymbol{K}_G v \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{K}_G$ 为几何刚度矩阵，它与外荷载产生的单元轴向力有关。

当不考虑重力二阶效应时，程序分析中使用的静力方程为：

$$F_E = \boldsymbol{K}_E v \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{K}_E$ 为结构的初始弹性刚度矩阵。

当需要考虑重力二阶效应时，程序分析中使用的静力方程为：

$$F = [\boldsymbol{K}_G + \boldsymbol{K}_E]\, v \tag{4}$$

程序通过求解方程(4)，即可考虑重力二阶效应的影响。

1.2 P-Δ 贡献分析实现方法

如上所述，重力二阶效应包括 P-Δ 贡献与 P-δ 贡献两部分。研究表明[3-4]，通常重力二阶效应中的 P-Δ 贡献比 P-δ 贡献更为显著。原因如下：其一，与层间位移相比，竖向构件自身的挠曲较小；其二，实际工程的竖向构件通常发生的是双曲率弯曲，与单曲率弯曲相比，双曲率弯曲的竖向构件 P-δ 贡献较小。

分析阶段同时考虑 P-Δ 贡献与 P-δ 贡献，每一个荷载组合都需要建立独立的非线性工况，会导致计算效率低。建议在分析阶段只考虑 P-Δ 贡献，在设计阶段通过对分析阶段的内力进行放大来考虑 P-δ 贡献，此方法也是目前国际和我国规范[5]推荐的做法。

在计算几何刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_G$ 时只考虑总竖向荷载产生的轴力即可精确地计算 P-Δ 贡献。在程序中可以通过在初始 P-Δ 分析中指定竖向荷载组合作为几何刚度矩阵的相关荷载，在后续分析中以此几何刚度矩阵为基础，建立各单工况的线性分析工况。这种计算方法的好处在于采用了指定的 P-Δ 分析工况，运算的全过程只需要计算一次几何刚度矩阵即可，计算效率高；同时由于各单工况为线性工况，可在设计时直接进行荷载组合。

2　关于刚重比的讨论

目前，我国主要采用刚重比作为弹性阶段是否考虑结构重力二阶效应的指标。《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)[6]规定，当 $EJ_d/H^2\sum_{i=1}^{n}G_i \geqslant 2.7$ 时，可不考虑重力二阶效应；当 $EJ_d/H^2\sum_{i=1}^{n}G_i < 1.4$ 时，重力二阶效应将会呈非线性关系急剧增长，结构不满足整体稳定性；当 $1.4 \leqslant EJ_d/H^2\sum_{i=1}^{n}G_i < 2.7$ 时，需要考虑重力二阶效应对结构内力和位移的不利影响。刚重比方法的提出基于许多假定条件，文献[7]中把高层建筑混凝土结构假定为具有中等长细比质量与刚度沿高均匀分布的悬臂杆，由欧拉公式得到顶部加竖向力时的临界荷载为：

$$P_{cr} = \pi^2\frac{EJ_d}{4H^2} \tag{5}$$

由于重力荷载沿高均匀分布，作用在悬臂杆顶部的临界荷载 P_{cr} 与重力荷载总和 $[\sum_{i=1}^{n}G_i]_{cr}$ 之间的关系为：

$$P_{cr} = \frac{1}{3}[\sum_{i=1}^{n}G_i]_{cr} \tag{6}$$

将式(6)代入(5)得：

$$[\sum_{i=1}^{n}G_i]_{cr} = 7.4\frac{EJ_d}{H^2} \tag{7}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

又利用能量法求出考虑重力二阶效应的结构侧向位移 Δ^* 和不考虑重力二阶效应的结构侧向位移 Δ 之间的关系为:

$$\Delta^* = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^{n} G_i / [\sum_{i=1}^{n} G_i]_{cr}} \Delta \tag{8}$$

基于式(7),(8)推导出侧向位移增幅和 $EJ_d/H^2 \sum_{i=1}^{n} G_i$(刚重比)之间的关系如式(9)所示,提出用刚重比作为控制其重力二阶效应的设计指标:

$$\Delta^* = \frac{1}{1 - \dfrac{0.135}{EJ_d/H^2 \sum_{i=1}^{n} G_i}} \Delta \tag{9}$$

根据式(9)可以得出:当 $EJ_d/H^2 \sum_{i=1}^{n} G_i = 2.7$ 时,$(\Delta^* - \Delta)/\Delta$ 约为 5%;当 $EJ_d/H^2 \sum_{i=1}^{n} G_i = 1.4$ 时,$(\Delta^* - \Delta)/\Delta$ 约为 10%。

最后假定倒三角形分布水平荷载作用下悬臂杆和结构整体位移相等,如图 4 所示,换算出刚重比和水平荷载之间的关系为:

$$\frac{EJ_d}{H^2 \sum_{i=1}^{n} G_i} = 0.135 \left(\frac{M_{ov}}{\sum_{i=1}^{n} G_i \cdot \frac{\Delta}{2}} + 1 \right) \approx 0.135 \frac{M_{ov}}{\sum_{i=1}^{n} G_i \cdot \frac{\Delta}{2}} \tag{10}$$

由式(10)可得出结构的弹性等效侧向刚度的算法为:

$$EJ_d = \frac{10.8qH^4}{120\Delta} \approx \frac{11qH^4}{120\Delta} \tag{11}$$

德国混凝土结构设计规范 DIN 1045-1[3] 第 8.6.2-(5)条规定,当结构的竖向构件分布基本对称,且扭转效应较小,结构满足抗侧刚度/(高度平方×重力荷载)即 $EJ_d/H^2 \sum_{i=1}^{n} G_i \geqslant 2.78$ 时可不考虑重力二阶效应的影响。此规定与我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)[4] 的规定基本相同。

这些年来,运用刚重比来控制结构的重力二阶效应在我国的高层建筑设计中得到了广泛的应用。对于结构体系较规则的高层建筑,在分析手段尚不完善的年代,对促进我国高层建筑的结构设计起到了一定的作用。然而刚重比方法在实际工程的应用中也暴露了一些问题:

(1)刚重比的基本力学模型为质量与刚度沿高分布均匀的悬臂杆,在许多的实际工程中出现不适用的情况。如在竖向荷载作用下已经存在横向变形的结构,存在加强层、转换层和大裙房等质量和刚度不能满足其等截面均值杆假定的结构。

(2)刚重比的方法把重力二阶效应对结构的影响表述为对结构顶点位移的影响,并据此判断结构是否需要考虑重力二阶效应。然而实际工程中结构顶点位移的变化并不能反映所有构件的内力的变化。

(3)对于规范规定不考虑重力二阶效应的结构,实际工程中不能保证所有构件的内力变化都在 5% 以内,对于此部分构件来说计算结果偏于不安全。

目前的计算手段已经比较完善,程序可以很容易实现 P-Δ 分析,对于刚重比存在的不足之处,可以通过程序较精确的 P-Δ 分析进行弥补。

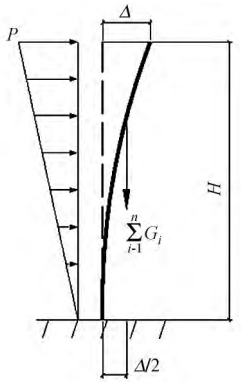


图 4 结构弹性等效刚度计算简图

3 结构与构件的二阶效应比

3.1 二阶效应比的定义

重力二阶效应对高层结构的影响表现为对结构整体参数如顶点位移、层间位移角、基底倾覆力矩和构件内力如轴力、剪力、弯矩的影响,且其对整体参数和构件内力的影响是不同的。为清晰表示重力二阶效应影响的大小,本文提出二阶效应比的概念,即考虑 P-Δ 贡献与不考虑 P-Δ 贡献结构整体参数或构件内力的比值。

结构整体参数的二阶效应比定义如下:

顶点位移二阶效应比为:

$$R_{\Delta,D} = \frac{D_{PD}}{D_{NPD}} \tag{12}$$

层间位移角二阶效应比为:

$$R_{\Delta,\theta} = \frac{\theta_{PD}}{\theta_{NPD}} \tag{13}$$

基底倾覆力矩二阶效应比为:

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$R^{B}_{\Delta,M} = \frac{M^{B}_{PD}}{M^{B}_{NPD}} \tag{14}$$

构件内力的二阶效应比定义如下:

轴力二阶效应比为:

$$R_{\Delta,N} = \frac{N_{PD}}{N_{NPD}} \tag{15}$$

弯矩二阶效应比为:

$$R_{\Delta,M} = \frac{M_{PD}}{M_{NPD}} \tag{16}$$

剪力二阶效应比为:

$$R_{\Delta,V} = \frac{V_{PD}}{V_{NPD}} \tag{17}$$

式中: D_{PD}, θ_{PD}, M^{B}_{PD}, N_{PD}, M_{PD}, V_{PD} 分别为考虑 P-Δ 效应的结构顶点位移、层间位移角、基底倾覆力矩和构件轴力、弯矩、剪力; D_{NPD}, θ_{NPD}, M^{B}_{NPD}, N_{NPD}, M_{NPD}, V_{NPD} 分别为不考虑 P-Δ 效应的结构顶点位移、层间位移角、基底倾覆力矩和构件轴力、弯矩、剪力。

3.2 二阶效应比结果分析

选择各有特点的 9 个高层建筑工程对其二阶效应比进行比较。采用我国及国际规范推荐的方法，分析阶段只考虑 P-Δ 贡献，各项目分别进行考虑与不考虑 P-Δ 的计算。根据计算结果统计结构整体参数二阶效应比及构件内力二阶效应比。

表 1 为根据程序的计算结果，统计在 50 年一遇风荷载作用下得到的各项目结构整体参数二阶效应比数据。

从表 1 的数据可知，项目 1 ~ 9 的顶点位移二阶效应比最大为 1.09，最小为 1.04，相对应的层间位移角二阶效应比、基底倾覆力矩二阶效应比的范围大概在 1.04 ~ 1.09 之间，即结构的顶点位移与层间位移角、基底倾覆力矩的二阶效应比接近。

表 2 为根据程序的计算结果，统计得到的各项目构件内力二阶效应比数据。为了得到结构构件在不同荷载组合下的二阶效应比，分别计算了如下 4 种荷载组合工况: 1) 工况 1: 1.2 恒载 + 1.4 活载 + 0.84 风荷载; 2) 工况 2: 1.2 恒载 + 1.4 活载 − 0.84 风荷载; 3) 工况 3: 1.2 恒载 + 0.98 活载 + 1.4 风荷载; 4) 工况 4: 1.2 恒载 + 0.98 活载 − 1.4 风荷载。

表 2 给出了构件内力二阶效应比的最大值，除此之外，项目 1 ~ 3 部分构件的二阶效应比在 1.1 ~ 1.2 之间变化; 项目 5，6 部分构件的二阶效应比在 1.1 ~ 1.15 之间变化; 其余项目部分构件二阶效应比的变化范围主要在 1.1 以内。从表 2 可知部分构件内力的二阶效应比大于结构整体指标的二阶效应

结构整体参数二阶效应比　　表 1

项目编号	结构体系	高度/m	基本周期/s	刚重比		顶点位移			最大层间位移角			倾覆力矩
				X	Y	D_{PD}/mm	D_{NPD}/mm	$R_{\Delta,D}$	θ_{PD}	θ_{NPD}	$R_{\Delta,\theta}$	$R^{B}_{\Delta,M}$
1	框筒	407.4	7.69	1.34	1.32	644.4	591.1	1.09	1/486	1/530	1.09	1.08
2	框筒	441	8.95	1.46	1.46	599.9	550.1	1.09	1/487	1/521	1.07	1.08
3	框筒	540	8.53	1.49	1.48	637.7	582.4	1.09	1/616	1/672	1.09	1.08
4	框筒	174	5.06	1.95	2.5	122.7	113.9	1.08	1/1 151	1/1 242	1.08	1.07
5	框筒	278.1	5.47	3.14	2.26	523.8	483.2	1.08	1/510	1/538	1.05	1.05
6	框筒	193	4.24	3.91	4.05	167.8	160.6	1.04	1/984	1/1 031	1.05	1.04
7	框筒	148.7	3.57	3.97	3.35	77.7	74.3	1.05	1/1 529	1/1 602	1.05	1.04
8	剪力墙	79.2	2.52	3.92	4.48	25.7	24.6	1.04	1/2 342	1/2 450	1.05	1.04
9	剪力墙	94.67	2.84	4	3.5	59.2	56.8	1.04	1/1 351	1/1 410	1.04	1.04

注: 1) 基本周期及刚重比均为未考虑 P-Δ 的计算结果; 2) 项目 5 为平面复杂的巨柱斜撑框架-组合核心筒结构，项目 7 为框架(带柱转换)-两端边筒结构。

构件二阶效应比最大值　　表 2

项目编号	轴力二阶效应比 $R_{\Delta,N}$			剪力二阶效应比 $R_{\Delta,V}$			弯矩二阶效应比 $R_{\Delta,M}$		
	柱	剪力墙	斜撑、桁架	柱	剪力墙	斜撑、桁架	柱	剪力墙	斜撑、桁架
1	1.03	1.03	1.20(1.36)	1.13	1.15(1.19)	1.09(1.24)	1.11(1.14)	1.16(1.22)	1.09(1.25)
2	1.09	1.09	1.20(1.27)	1.19	1.13(1.44)	1.10(1.22)	1.12(1.14)	1.16(1.27)	1.12(1.35)
3	1.03	1.02	1.16(1.27)	1.12(1.23)	1.10(1.19)	1.08(1.19)	1.12(1.18)	1.10(1.38)	1.09(1.33)
4	1.01	1.01	—	1.03	1.08(1.17)	—	1.11	1.11	—
5	1.05	1.04	1.11(1.13)	1.14(1.42)	1.10(1.16)	1.14	1.15(1.29)	1.12(1.15)	1.09(1.34)
6	1.02	1.04	1.11	1.07	1.07	—	1.14	1.09	1.07
7	1.01	1.01	—	1.04	1.02	—	1.04	1.02	—
8	—	1.01	—	—	1.03	—	—	1.05	—
9	—	1.01	—	—	1.03	—	—	1.05	—

注: 1) 表中数据为不利工况二阶效应比最大值的统计结果，括号内数据为 4 种工况二阶效应比最大值的统计结果; 2) 项目 4、项目 7 无斜撑、桁架等构件。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

比，最大可达 1.2 左右，设计中不可忽略。

3.3 刚重比与二阶效应比的关系

上述工程案例中发现，刚重比能基本反映结构整体参数的重力二阶效应，但是无法反映单个竖向构件内力的二阶效应。

从表 1、表 2 可知，9 个案例中，刚重比略小于 1.4 的项目 1 的整体参数二阶效应比在 1.1 以内，构件内力二阶效应比在 1.03 ~ 1.2 之间变化。从表 2 可知，刚重比在 1.4 ~ 2.7 之间的项目 2 ~ 5 的构件内力二阶效应比在 1.01 ~ 1.2 之间变化；其中，项目 5 的刚重比为 2.3 左右，但其二阶效应比能达到 1.15，究其原因是项目 5 在自重作用下就产生一定的侧移，这恰好说明，对于此类结构，刚重比未能真实反映重力二阶效应对构件内力的影响。

刚重比大于 2.7 的项目 6 ~ 9 的构件内力二阶效应比在 1.01 ~ 1.14 之间变化；其中，项目 6 的刚重比为 4.0 左右，按规范的要求，可不考虑重力二阶效应的影响，但实际上项目 6 为存在楼板大开洞、核心筒偏置的复杂结构，计算得到的构件内力二阶效应比较大，设计中应考虑重力二阶效应的影响。

以项目 1 和项目 6 为例分别详细说明 P-Δ 对构件内力的影响。

由图 5(a) ~ (c) 可知，项目 1 的柱轴力二阶效应比 $R_{\Delta,N}$ 在 1.05 以内，剪力二阶效应比 $R_{\Delta,V}$ 最大值在 1.13 左右，弯矩二阶效应比 $R_{\Delta,M}$ 最大值在 1.11 左右；由图 5(d) ~ (f) 可知，项目 1 的剪力墙轴力二阶效应比 $R_{\Delta,N}$ 在 1.05 以内，剪力二阶效应比 $R_{\Delta,V}$ 最大值在 1.15 左右，弯矩二阶效应比 $R_{\Delta,M}$ 最大值在 1.16 左右，大部分集中在 1.05 ~ 1.15 之间；由图 5(g) ~ (i) 可知，项目 1 的斜撑轴力二阶效应比 $R_{\Delta,N}$ 最大值在 1.2 以内，剪力二阶效应比 $R_{\Delta,V}$ 最大值在 1.1 左右，弯矩二阶效应比 $R_{\Delta,M}$ 最大值在 1.1 左右。从以上数据可知，不同构件的不同内力的二阶效应比不同，部分构件的内力二阶效应比在 1.1 ~ 1.2 之间，设计时加以考虑亦能保证结构的承载力要求。

由图 6(a) ~ (c) 可知，项目 6 的柱子轴力二阶效应比 $R_{\Delta,N}$ 在 1.05 以内，剪力二阶效应比 $R_{\Delta,V}$ 最大值为 1.07，弯矩二阶效应比 $R_{\Delta,M}$ 为 1.14；由图 6(d) ~ (f) 可知，项目 6 的剪力墙轴力二阶效应比 $R_{\Delta,N}$ 在 1.05 以内，剪力二阶效应比 $R_{\Delta,V}$ 最大值为 1.07，弯矩二阶效应比 $R_{\Delta,M}$ 最大值在 1.08 左右，大部分集中在 1.05 ~ 1.08 之间；由图 6(g) ~ (h) 可知，项目 6 的斜撑轴力二阶效应比 $R_{\Delta,N}$ 最大值在 1.1 左右，弯矩二阶效应比 $R_{\Delta,M}$ 最大值在 1.08 左右。从以上数据可知，项目 6 的刚重比大于 2.7，结构的整体二阶效应比较小，大部分构件的二阶效应比都在 1.05 以内，但仍有部分构件的二阶效应比大于 1.05，在设

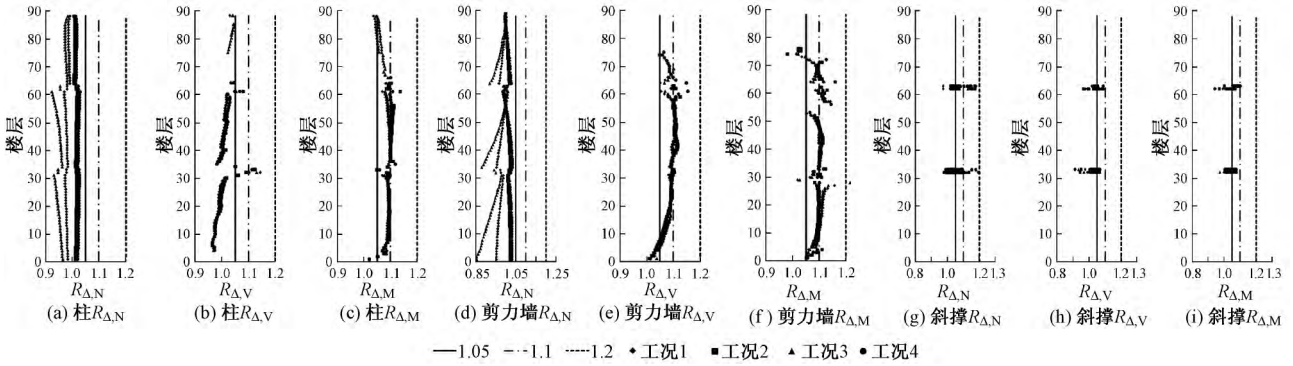


图 5 项目 1 某柱、剪力墙、斜撑的轴力、剪力、弯矩二阶效应比

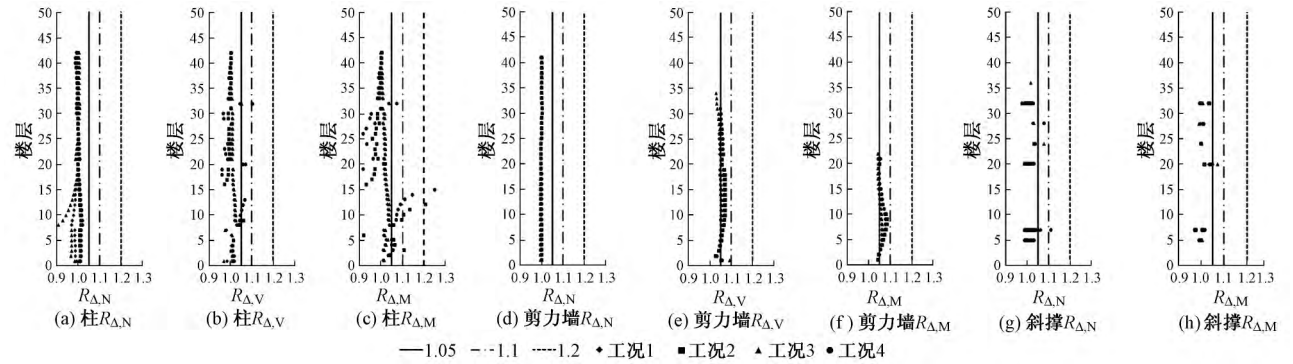


图 6 项目 6 某柱、剪力墙、斜撑的轴力、剪力、弯矩二阶效应比

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

计中不可忽视重力二阶效应对这部分构件的影响。

4　结论和建议

(1) 重力二阶效应对高层结构的影响分别表现为对结构整体参数如顶点位移、层间位移角、基底倾覆力矩和构件内力如轴力、剪力和弯矩的影响。刚重比的概念把重力二阶效应对结构的影响表述为对结构顶点位移的影响是不全面的。

(2) 对实际工程项目 7 ~ 9 的结果研究发现，对于刚重比大于 2.7，且质量和刚度沿高分布均匀的一般高层建筑，其整体参数及构件内力的变化均在 5% 以内，满足工程设计精度的要求。

(3) 对实际工程项目 1 ~ 6 的结果研究发现，结构顶点位移的二阶效应比与层间位移角、基底倾覆力矩的二阶效应比接近，表明 P-Δ 效应对结构顶点位移的影响可以反映其对其他结构整体参数影响。而 P-Δ 效应对结构整体参数的影响和对构件内力的影响程度不同，对部分构件内力的影响更大，设计中须考虑 P-Δ 效应对构件内力的影响。

(4) 现有程序已较完善，容易实现 P-Δ 效应的计算，根据本文的研究结果，建议一般的高层建筑结构宜考虑 P-Δ 效应的影响，对于存在竖向或平面不规则、在竖向荷载作用下存在侧移等不规则高层建筑结构及超高层结构应考虑 P-Δ 效应的影响。

致谢：本文在撰写的过程中，得到了深圳力鹏工程结构技术有限公司孙仁范教授、王森博士、刘跃伟博士等工程师的指导和支持，在此表示感谢。

参　考　文　献

[1] GRAHAM H POWELL. Modeling for structural analysis: behavior and basics [M]. Berkeley: Computers and Structures Inc., 2010.

[2] EDWARD L WILSON. Static and dynamic analysis of structures [M]. 4th ed. Berkeley: Computers and Structures Inc., 2010.

[3] CSI analysis reference manual [M]. Berkeley: Computers and Structures Inc., 2013.

[4] 李楚舒，李立，刘春明，等. 结构设计中如何全面考虑 P-Δ 效应 [J]. 建筑结构，2014，44(5)：78-82.

[5] 混凝土结构设计规范：GB 50010—2010 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[6] 高层建筑混凝土结构技术规程：JGJ 3—2010 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[7] 徐培福，肖从真. 高层建筑混凝土结构的稳定设计 [J]. 建筑结构，2001，31(8)：69-72.

[8] Plain, reinforced and pre-stressed concrete structures, part i: design and construction: DIN1045-1 [S]. Berlin: German Standard Institution, 2001.

《建筑结构》征订启事

2017 年全年期刊(24 本正刊 +4 本减震技术通讯) 注：因平邮丢失现象严重，且后期无法跟踪，建议选用挂号			432 元/套(每期挂号) 360 元/套(每期平邮)
2016 年全年期刊(24 本正刊 +4 本减震技术通讯)			360 元/套
正刊合订本 (不含技术通讯)	2015 年(2016 年 4 月出版，400 元，上中下三册)		
	2014 年(2015 年 3 月出版，400 元，上中下三册)		
	2013 年(2014 年 3 月出版，400 元，上中下三册)		
	2012 年(2013 年 2 月出版，200 元，上下两册)		
	2010 年(2011 年 3 月出版，160 元，上下两册)		
	2009 年(2010 年 3 月出版，160 元，上下两册)		
	2008 年(130 元，上下两册)	2007 年(130 元)	2006 年(95 元)
	2005 年(95 元)	2004 年(70 元)	2003 年(70 元)
光盘	2006 ~ 2010 年，200 元/盘	2001 ~ 2005 年，1991 ~ 2000 年，1975 ~ 1990 年，均为 150 元/盘	1975 ~ 2010 年一套(共 4 张盘) 优惠价为 530 元
2016 年上半年增刊(第五届建筑结构抗震技术国际会议论文集)(上下册)			500 元
2015 年下半年增刊(2015 城市地下空间综合开发技术交流会论文集)			300 元
2015 年上半年增刊(第五届全国建筑结构技术交流会论文集)(上下册)			500 元
2014 年下半年增刊(第四届建筑结构抗震技术国际会议论文集)			400 元
2014 年上半年增刊(第二届大型建筑钢与组合结构国际会议论文集)			400 元
2013 年下半年增刊(含城市地下空间综合开发研讨会论文专栏)			300 元
2013 年上半年增刊(第四届全国建筑结构技术交流会论文集)(上下册)			500 元
2012 年上半年增刊(建筑结构抗震技术国际论坛论文集)			300 元
2012 年下半年增刊(建筑结构高峰论坛——复杂建筑结构弹塑性分析技术研讨会论文集)			200 元
2011 年上半年增刊(第三届全国建筑结构技术交流会论文集)简刻光盘版			150 元

汇款方式：银行帐号：110908001310606；开户行：招商银行北京东三环支行；单位名称：亚太建设科技信息研究院有限公司。也可直接在《建筑结构》网站上通过支付宝完成付款、订购等事宜。联系方式：010-57368777。

银行汇款后请将下列信息撰写完整后，连同汇款底单一起传真至 010-57368781 或 Email 至 faxing@cadg.cn。

姓名：_____；通信地址：_____省_____市_____；邮编：_____；手机：_____；Email：_____；

订阅内容：_____；总金额：_____元；发票抬头：_____(如需增值税专用发票请特别说明)。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net