

水平地震作用下大底盘多塔楼结构抗扭设计方法

魏 琰 王 森

(上海魏琰工程结构设计事务所(深圳部) 深圳 518034)

[提要] 对大底盘多塔楼结构的自振特性及水平地震作用下的受力特性进行了分析,提出了多塔楼结构的抗扭设计要点和计算分析方法,以及多塔楼结构抗扭设计控制指标等。最后通过一不对称三塔楼结构的实际工程的抗扭设计对本文方法进行了说明。

[关键词] 多塔楼 地震作用 扭转 设计方法

Torsional Design Method of Multi-tower Structure Under Horizontal Earthquake Action/Wei Lian, Wang Sen(Shenzhen Representative, Shanghai Weilian Structure Design Office, Shenzhen 518034, China)

Abstract: Based upon the analysis on natural vibration behavior of multi-tower structure, this paper presents some reasonable and feasible methods including main design points, analysis methods and control value for designing such structures under horizontal earthquake action. It also presents a practical 3-tower asymmetric structure to show the application of the design method.

Keywords: multi-tower; seismic action; torsion; design method

0 前言

大底盘多塔楼结构底部几层为大底盘,在水平地震和风荷载作用下各塔楼的受力变形受到底盘结构各楼层首先是底盘顶层在平面内的制约,因此多塔楼结构的计算分析和实际的受力状况远比单塔楼结构的复杂^[1-3]。

大底盘多塔楼结构由于建筑场地的限制与建筑功能的不同要求,多为不对称结构,根据结构受扭动力特性的不同,一般可分为五类:1)底盘对称,各塔楼结构自身及位置均对称且层数及层高相同;2)底盘对称,各塔楼位置对称,层数及层高相同,但结构自身不对称;3)情况1,2中塔楼层数或层高不同的结构;4)底盘不对称,各塔楼结构自身对称;5)底盘与各塔楼位置与结构均为不对称结构。

当底盘为对称结构,上部各塔楼布置位置对称,不论塔楼结构本身对称与否,大底盘多塔楼结构均为对称结构,其中塔楼本身对称者称为全对称多塔楼结构,塔楼本身不对称时,称为次全对称多塔楼结构。其余多塔楼结构均为不对称多塔楼结构。

大底盘多塔楼高层建筑在竖向荷载作用下的设计计算并无困难,水平地震作用下主要的问题之一是怎样做好结构的抗扭设计。研究表明,在水平地震作用下全对称多塔楼结构不产生扭转振动,但次全对称多塔楼结构由于单塔本身并不对称仍将产生扭转振动,至于不对称多塔楼结构由于整个结构的不对称性将在水平地震作用下产生明显的扭转振动。因而,研究大

底盘多塔楼结构在水平地震作用下的扭转振动特性,提出并确定这类结构在地震作用下的抗扭设计方法,是工程实践中一项重要的、有实际意义的课题。

1 规范的有关规定

89抗规^[4]及新抗规^[5]对于多塔楼结构的抗震设计均没有述及,新高规^[6]第十章首次把多塔楼结构与带转换层结构、带加强层结构、错层结构与连体结构一起列为复杂高层建筑,在10.6节内给出了一些概念性和构造措施方面的规定。这对提高多塔楼结构的抗震性能有极大的指导意义,但结构工程师在设计这类结构时在计算方面经常会遇到一些疑难困惑的问题,期盼早日给出妥善解决的方法。

2 多塔楼结构的扭转自振特性

多塔楼结构的扭转特性分别表现为底盘的扭转振动,塔楼各自的扭转振动及其相互组合。底盘结构与诸塔楼同时在一个方向出现扭转振动时,整个结构的扭转必为主振型,但振型数往往位于较高阶。分析表明,多数情况下同一振型中各塔楼的振动是各异的。扭转振动因子大于50%,以扭转为主的振动也可能出现在仅某一塔楼或某些塔楼以扭转为主振动,其振型阶数低于底盘及塔楼均为扭转振动的振型阶数,而平动振动因子大于50%的平动为主振型也可能出现底盘或某塔楼或某些塔楼以扭转为主振动。

图1为一全对称的双塔楼结构,底盘结构4层,上部双塔楼(图中折线范围内)均为16层, x, y 向轴网跨度分别为8m,6m,柱截面为800×800, x, y 向框架梁

截面为 $300 \times 800, 300 \times 600$ 。计算求得的结构前6个自振周期及振型因子见表1。表中,结构的第2空间振型底盘在扭转振动,但上部双塔主要在 y 方向反向平动振动,其振型因子是以 y 向平动为主,其性质是一种反对称振型。结构的第5空间振型为底盘及上部双塔均按同一方向扭转振动。结构的第6空间振型为底盘不动、上部塔楼对称扭转振动,也是以扭转为主的振动。研究表明,在水平地震作用下全对称多塔楼结构不出现扭转耦连振动。

全对称双塔楼结构自振周期及振型因子(%) 表1

振型	周期(s)	x向平动因子	y向平动因子	扭转振动因子	振型	周期(s)	x向平动因子	y向平动因子	扭转振动因子
1	2.2079	0	100	0	4	1.5571	100	0	0
2	2.1039	0	100	0	5	1.4617	0	0	100
3	1.6489	100	0	0	6	1.4444	0	0	100

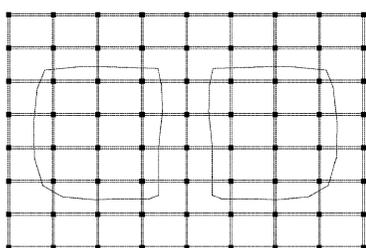
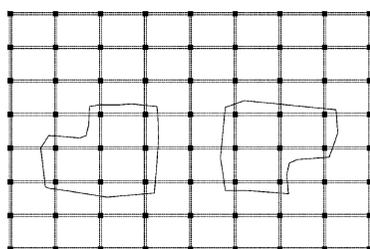


图1 全对称双塔楼结构平面



不对称双塔楼结构平面

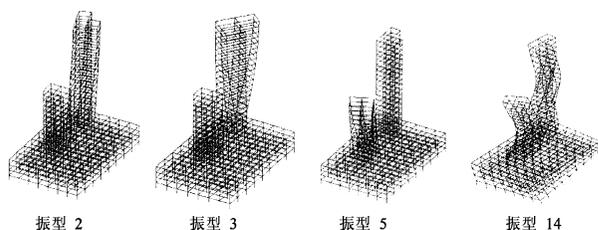


图2 不对称双塔楼平面与结构振型

图2为一不对称的双塔楼结构,底盘结构4层,上部两个塔楼(图中折线范围内),其中左边塔楼20层(塔1),右边塔楼12层(塔2),结构轴网跨度,柱梁截面与图1中分析算例相同。计算求得的结构前15个自振周期及振型因子见表2。图2中结构的第2空间振型图是以塔1的 y 向平动为主的振型,但该振型已包含有较多的扭转振动分量;图2振型3和5分别为

一个塔在扭转振动,另一个塔仍是平动振动,第3振型以塔1的扭转振动为主,其扭转振动因子大于50%,第5振型,是以塔2的扭转振动为主的振型,其平动振动因子大于50%;塔1,2底盘的整体扭转振动振型出现在第14,15的较高振型,图中仅给出了以扭转为主的第14空间振型图。由此可见,不对称多塔楼结构在平动为主的振型中(如第2振型)已包含较大的扭转振动,而扭转为主的振型中(如第3,6,14振型)也包含了较大的平动振动,整个结构全扭转时的以扭转为主振型出现在第14,15振型。

不对称双塔楼结构自振周期及振型因子(%) 表2

振型	周期(s)	x向平动因子	y向平动因子	扭转振动因子	振型	周期(s)	x向平动因子	y向平动因子	扭转振动因子
1	2.7853	0	99	1	9	0.6002	50	1	49
2	1.9711	78	0	22	10	0.5383	0	99	1
3	1.8624	22	1	77	11	0.4759	1	85	14
4	1.5794	0	99	1	12	0.4011	1	93	6
5	1.1284	52	0	48	13	0.3926	94	3	3
6	1.0857	48	0	52	14	0.3783	6	27	67
7	0.8653	0	99	1	15	0.3467	1	1	98
8	0.6187	50	0	50					

图3为一不对称的三塔楼结构,底盘结构4层,上部3个塔楼(图中折线范围内)均为20层,结构轴网跨度、柱梁截面与图1所示分析算例相同。计算求得的结构前9个自振周期及振型因子见表3。图3给出了结构的第2、第4空间振型图,第2与第4振型分别为以多塔的 y 向及 x 向平动为主的振型,但该振型已包含有较多的扭转振动分量。上部塔楼及底盘的整体扭转振动振型出现在较高的第7,8,9振型。图3还给出的是扭转为主的第7空间振型图。由此可见,对于不对称多塔楼结构,平动为主的振型中可能包含较大的扭转振动,而底盘及上部塔楼同时扭转为主的振型出现在较高阶7,8,9振型中,再次论证了上述的多塔楼结构的扭转自振特性。

不对称三塔楼结构自振周期及振型因子(%) 表3

振型	周期(s)	x向平动因子	y向平动因子	扭转振动因子	振型	周期(s)	x向平动因子	y向平动因子	扭转振动因子
1	2.7857	1	99	0	6	1.9741	74	0	26
2	2.6274	0	99	1	7	1.8598	19	1	80
3	2.5821	0	99	1	8	1.8495	19	1	80
4	2.1027	87	0	13	9	1.8428	22	1	77
5	2.0567	79	0	21					

综上所述,不对称的多塔楼结构在水平地震作用下的扭转振动是一个复杂的组合扭转振动,它包含了底盘的扭转振动,各个单塔楼各自的扭转振动及其相互组合,对应于任一有扭转振动振型的自由振动,底盘

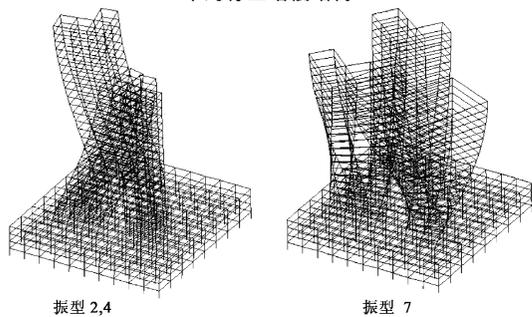
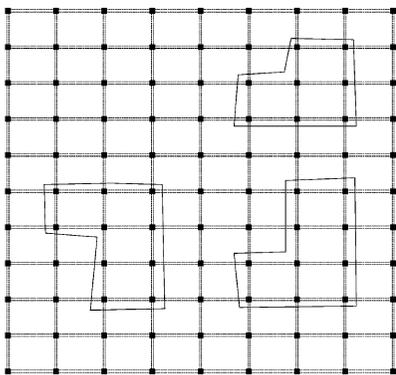


图3 不对称三塔楼结构平面与振型

及各塔楼均可能同时出现平动振动与扭转振动。因此平动为主的振型可能包含相对较大的底盘扭转振动或较大的某个单塔的扭转振动,而底盘及各单塔或多数单塔均为扭转振动为主的振型,其扭转振型因子必大于50%,但可能系较高阶振型,由于振型参与系数较小,造成结构的扭转位移并不一定会在整个结构扭转位移中占主要成分。多塔楼结构的这些扭转振动基本特性应在抗扭设计方法中得到充分体现与反映。

3 多塔楼结构的抗扭设计

水平地震作用下多塔楼结构的抗扭设计主要包含底盘结构的抗扭,单塔楼的抗扭以及楼盖平面内的应力分析及设计三部分内容。下面将分述多塔楼结构的设计要点、计算分析和相应的控制措施。

3.1 设计要点

新高规第十章 10.1 节、10.6 节对多塔楼结构的抗扭设计有一些具体规定,这些条文要求多塔楼结构布置尽量对称规则,减少扭转的不利影响,同时要求连接各塔楼的底盘屋面及上下层楼盖应具有足够的平面内强度、刚度及抗裂能力,保证水平地震(包含小震、中震、大震)作用下各塔楼能协同工作。

根据实际设计经验,多塔楼结构的抗扭设计尚应注意以下诸点:1)多塔楼位置的布置宜使底盘结构具有足够的抗扭刚度;2)各塔楼自身应为一个具有独立抗扭能力的单塔结构,其各层的抗侧、抗扭刚度自底到顶应连续可靠;3)在底盘屋顶各塔楼的底层,层抗扭刚

度与底盘各楼层结构的层抗扭刚度相比一般小得较多,为层抗扭刚度突变楼层,设计时应采取措施适当加强;4)底盘屋面楼层是连接各塔楼在地震作用下协同工作的主要构件,对于明显不对称的多塔楼结构,应采用有限元分析程序分析楼层平面内的应力分布,找出应力较集中的部位及量值,采取相应的加强构造措施。

3.2 计算分析

1. 对称多塔楼结构

对称多塔楼结构在水平地震作用下不产生平动与扭转耦连,次全对称多塔楼结构在水平地震作用下扭转反应一般较小,但为了保证这类结构在地震作用下的抗震安全性,应采取措施保证底盘及塔楼结构具有必要的抗扭刚度和抗扭承载力。

新高规第 3.3.3 条引入的偶然偏心计算规定在一定程度上解决了这一问题,考虑到大底盘结构一般水平尺度较大,地扭转运动可能对结构扭转产生一定的不利影响以及结构本身质量或荷载的不均匀性,在计算中引入了偶然偏心计算结构的扭转是必要的,建议各塔楼及底盘结构均按各自同一侧 $\pm 5\%$ 的偶然偏心来进行计算。

2. 不对称多塔楼结构

(1)不对称大底盘多塔楼结构在水平地震作用下的计算方法可采用扭转耦连的振型分解法及 CQC 组合法,实际上与不规则单塔结构的计算方法相同,用此法可求出底盘和各塔楼结构各楼层的平动位移和扭转角以及所有构件的内力。目前国际上一些通用有限元分析软件 ETABS, SAP2000, MIDAS-GEN 以及国内结构分析软件 SATWE 等均可以考虑结构的扭转效应。

(2)抗扭计算时,按照 CQC 法考虑结构的扭转地震作用效应 S 求出各楼层的扭转角及层间扭转角。除全对称结构外,各振型 j 内均可能有 S_j 存在,多塔楼结构楼层的扭转位移在各振型可能都有反映,且多塔楼结构楼层数较多,因此计算时宜多取振型数才能求出较为准确可靠的计算结果,建议一般取不少于 $(12 \sim 18)m$ 个振型, m 为塔楼数目,并符合新高规质量参与系数大于 90% 的规定。

(3)根据新高规第 3.3.3 条引入的偶然偏心,对各塔楼及底盘结构均按各自同一侧 $\pm 5\%$ 的偶然偏心来计算结构楼层的扭转位移比。各塔楼及底盘结构的扭转位移比控制指标应满足本文第 4 节的有关规定。

(4)各塔楼是组成大底盘多塔楼结构的主要元件,且在后浇带尚未封闭时各塔楼系独立工作,因此需对各单塔楼进行水平地震作用下的抗扭计算复核,使各塔楼在不考虑底盘各层楼盖相互约束的条件下,单塔结构各层的变形与内力能符合新抗规和新高规的有关

要求。

(5) 对大底盘多塔楼结构按整体进行水平地震作用下的内力与变形计算, 求出各楼层的扭转位移并满足新高规的有关要求。由于考虑了底盘各层楼盖协调变形的影响, 各塔楼结构的受力与变形将与按单塔计算时有所不同, 有的会增大, 有的会减小。因此, 多塔楼结构的抗震计算应以按整个结构共同工作进行计算的结果为最终依据, 按单塔的计算结果只是确保塔楼扭转变形能满足新高规要求的一个初步结果。有经验的工程师对单塔楼的结构布置和构件尺寸等选择较为合理时, 单塔楼在水平地震作用下的计算也可免去。

(6) 应采用有限元程序对底盘结构屋面及上下二层楼盖按平面内为弹性楼盖进行计算, 求出水平地震作用下楼盖平面内的应力状态, 进行合理的构造与配筋设计, 现在较适用的国外程序有 SAP2000, ETABS, MIDAS-Gen 等。

(7) 底盘上部塔楼底层为层扭转刚度突变层, 或遇塔楼部位有层扭转刚度薄弱层时, 建议抗扭计算时适当采用抗扭增大系数以增强其抗扭能力。

3.3 构造设计

按新高规的有关规定确定结构构件的抗震等级及有关构造措施, 对底盘上各塔楼底层竖向构件的抗扭能力应适当增强。

4 多塔楼结构抗扭设计指标的控制

多塔楼结构抗扭设计指标的控制要求, 原则与单塔结构的一致, 但针对大底盘多塔楼结构的特点进行了以下几点分析。

(1) 新高规第 4.3.5 条对结构的扭转周期比进行了规定, 但新高规并未明确这一规定是否也适用于大底盘多塔楼结构。

在全对称或次全对称多塔楼结构中, 水平地震作用下结构的扭转反应为零或很小, 主要考虑偶然偏心引起的结构扭转, 此时结构的扭转周期比一般均能满足新高规的要求。

在不对称多塔楼结构中, 各振型均含有底盘或塔楼结构的扭转振动在内, 扭转振型因子大于 50% 以扭转为主的振型可能为某一或某几个塔楼为主的扭转振动, 并不一定是底盘和所有塔楼同方向扭转为主的振动。所以抗震设计控制的第一扭转为主的周期与第一平动为主的周期的比值小于 0.85 或 0.9, 其实际物理含义并不明确, 而以底盘或各塔同向扭转振动为主的振型往往为较高阶振型, 上述规定均能满足, 因此在多塔楼结构中控制结构扭转周期比实际意义不很大, 关键是要进行新抗规和新高规关于扭转位移比的复核, 使其结果满足规范的要求。

(2) 新高规第 4.3.5 条对结构的扭转位移比进行了规定, 这一规定实质上是控制多塔楼结构抗扭性能的关键, 设计计算中必须执行。多塔楼结构的底盘结构往往抗侧及扭转刚度均较大, 可能出现平动位移 Δ_a 很小的情况, 但有时即使层扭转角很小, 也可能出现较大的扭转位移比值, 使扭转位移比超出新高规 1.4 ~ 1.5 的要求。反之, 当塔楼结构较柔时可能出现 Δ_a 值较大, 允许扭转位移比 1.4 ~ 1.5 的要求可能偏高, 因此, 应如不对称不规则单塔楼结构扭转位移比验算一样^[7], 引入平均位移 Δ_a 与层间位移限值 Δ_{ui} 的比值 ζ , 根据 ζ 值的大小来确定许可的扭转位移比, 见文[7]。

(3) 在水平地震作用下底盘及各塔楼结构楼层均产生扭转角, 可能使层间竖向构件产生较大的扭矩, 应进行竖向构件的抗扭承载力及变形验算。

(4) 多塔楼结构底盘顶层楼盖为协调各塔楼共同工作, 在水平地震作用下可能在某些部位产生较大的平面内应力, 考虑到楼盖面积较大, 可将应力值分高、中、低三个区, 可着重在较高应力区加强配筋构造措施, 在可能情况下不对全楼盖采取统一的加强措施是较为合理的。

(5) 对不对称多塔楼结构应考虑双向水平地震作用下底盘及各塔楼的扭转地震作用效应, 并取双向地震作用和考虑偶然偏心单向水平地震作用下的较大值进行结构设计。

5 工程实例

工程总建筑高度 97.2m, 地下 2 层, 地上裙房 4 层为商场, 层 5 为屋顶花园, 上部三个塔楼为 27 层的住宅, 其中左边塔楼称为塔楼 1, 右下角塔楼称为塔楼 2, 右上角塔楼称为塔楼 3。结构转换层位于层 6 楼面, 裙房布置见图 4。建筑物抗震设防烈度 7 度, 场地类型 III 类, 结构类型为大底盘多塔楼的部分框支抗震墙结构。工程属于不对称多塔楼结构。

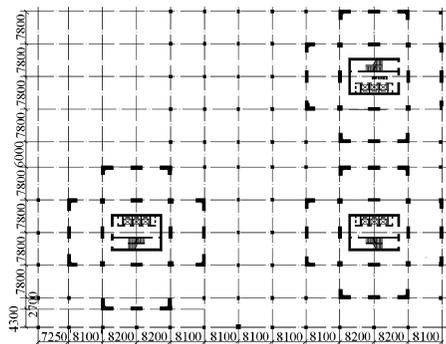


图 4 结构平面布置示意图

(1) 结构周期 表 4 列出结构前 6 个自振周期及振型因子计算结果。其中结构第 4 振型是以塔 1 和塔 2 扭转振动为主、塔 3 平动为主的振型; 底盘及三个塔

均为扭转振动为主的振型为第 12 振型, 其扭转振动因子为 97%。扭转为第 4 振型的周期与平动为主的第一振型的周期之比小于 0.85, 满足新高规的规定。如前面所述, 对于多塔楼结构而言, 其扭转振动十分复杂, 主要应验算底盘及诸塔楼结构的扭转位移比。

工程结构自振周期及振型因子(%) 表 4

振型	周期 (s)	x 向平动因子	y 向平动因子	扭转振动因子	振型	周期 (s)	x 向平动因子	y 向平动因子	扭转振动因子
1	1.9407	1	99	0	4	1.6416	19	2	79
2	1.8704	3	97	0	5	1.6072	6	1	93
3	1.8178	2	96	2	6	1.5713	89	3	8

(2)地震作用振型数 取结构前 36 个振型计算结构的地震作用, x, y 向的振型质量参与系数分别为 93.2%, 93.6%, 满足新高规的要求。

(3)楼层层间最大位移与层高之比 结构底盘及上部三塔楼在地震作用下的楼层层间最大位移与层高之比见表 5。从表中可以看出, 各塔楼及底盘结构的计算结果均满足新高规的要求。

地震作用下楼层层间最大位移与层高之比 表 5

x 向地震				y 向地震			
底盘	塔楼 1	塔楼 2	塔楼 3	底盘	塔楼 1	塔楼 2	塔楼 3
1/4753	1/2520	1/2348	1/2180	1/3956	1/2192	1/1723	1/1583

(4)楼层扭转位移比 计算得到考虑偶然偏心影响的 x, y 向地震作用下, 塔楼的最大水平位移(层间位移)与楼层平均值之比最大分别为 1.36, 1.29, 此时相应楼层的最大层间位移与层高之比分别为 1/2011, 1/1965, 大底盘上一层最大水平位移(层间位移)与楼

层平均值之比分别为 1.03, 1.08, 此时楼层的楼层最大层间位移与层高之比分别为 1/8012, 1/6318, 均满足新高规的要求。

(5)竖向构件的抗扭设计 经复核, 工程的竖向构件承受的地震作用扭矩均不大, 对截面尺寸及配筋的影响也不大。有关竖向构件的抗扭承载力及配筋受楼层扭转角引起的附加扭矩作用的影响尚有待深入的研究。

(6)楼层在地震作用下的应力分布 采用 ETABS 分析软件得到的地震作用下层 5(底盘顶层楼盖)楼板应力分布结果表明, 大部分区域的板面内正应力均较小, 约在 0.2N/mm² 以下, 在筒体及框支柱附近的楼面均有较大的应力区, 最大正应力达 0.6 N/mm²。根据计算结果, 只需在筒体及框支柱附近的楼面区域加强楼板配筋。

参 考 文 献

- 薛彦涛, 魏 琏. 底部整体上部多塔结构地震反应分析. 建筑结构学报, 1988, (3).
- 姜 宇, 程 辉, 施 昌. 大底盘上对称多塔楼高层建筑的振动分析. 建筑结构, 2001, 31(4).
- 吴耀辉, 姜 宇, 李爱群等. 大底盘多塔楼结构抗震分析研究进展. 建筑结构, 2003, 33(9).
- 建筑抗震设计规范(GBJ11-89). 中国建筑工业出版社, 1989.
- 建筑抗震设计规范(GB50011-2001). 中国建筑工业出版社, 2001.
- 高层建筑混凝土结构技术规程(JGJ3-2002). 中国建筑工业出版社, 2002.
- 魏 琏, 王 森, 韦承基. 水平地震作用下不对称不规则结构抗扭设计方法研究. 建筑结构, 2005, 35(8).
- 魏 琏, 王 森. 论水平地震作用下对称和规则结构的抗扭设计. 建筑结构, 2005, 35(5).
- 魏 琏. 高层建筑结构位移控制研讨. 建筑结构, 2000, 30(6).
- 魏 琏. 地震作用下建筑结构变形计算方法. 建筑结构学报, 1994, (4).
- 魏 琏. 水平地震作用下不对称建筑的抗震计算. 建筑科学, 1990, (1).

(上接第 65 页)

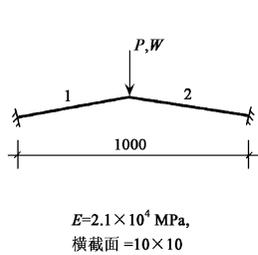


图 4 肘形刚架的杆件参数

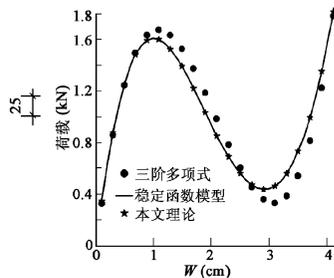


图 5 肘形刚架的后屈曲分析

成拉力。如果在屈曲点荷载继续增加, 刚架将会向下跳跃以在相反的方向承受此荷载。如图 5 所示, 在整个屈曲过程中, MEP 单元的计算结果与精确解吻合极好。

5 结 论

(1)MEP 单元避免了稳定函数单元在轴力变号时

刚度系数表达式的不一致。

(2)MEP 单元的精度高于 PEP 单元, 并且易于推广应用于变截面及弹塑性梁柱。

(3)由 MEP 单元模型导出的弯曲刚度系数曲线与精确值吻合很好。

(4)由 MEP 单元模型导出的刚度系数表达式比较简单, 便于工程应用。

参 考 文 献

- Chan S L, Kitipornchai S. Geometric nonlinear analysis of asymmetric thin-walled beam-columns. Engng. Struct., 1987, (9).
- Oran C. Tangent stiffness in plane frames. J. Struct. Div., ASCE, 1973, 99(6).
- Chan S L, Zhou Z H. Pointwise equilibrating polynomial element for nonlinear analysis of frames. J. Struct. Engng., ASCE, 1994, 120(6).
- 宋启根, 罗穆勇, 宋 丹. 框架非线性分析的新梁柱单元. 力学季刊, 2001, 22(3).