

# 建筑抗震设计的屈服判别法及其工程应用

魏 琏 王 森

上海魏琏工程结构设计事务所（深圳部）

## Yield Prediction Method and Its Application in Seismic Design of Building Structure

### [摘要]

本文提出的建筑结构抗震设计屈服判别法是判别实际结构在地震作用下构件屈服部位，屈服类型及屈服时间的一个有效可行的方法。文中提出的计算方法和屈服判别原则为找出结构的薄弱部位，针对性地采取加强措施，保证结构满足规范“小震不坏，中震可修”，进而满足“大震不倒”的抗震设防目标提供了量化的计算方法。本文还提供了采用屈服判别法分析计算的不同结构类型的三个实际工程案例。

### Abstract

This paper presents the yield prediction method which can find out the weak member to be yielded, its yield type and the yield moment of a building structure under certain intensity of seismic action. The calculation methods and yield prediction principle in this paper provide the quantified method to pick up the weak members of the structure, take enforcement measures and ensure the structure satisfying the anti-seismic fortify target of “no destory under minor earthquake, repairable under middle earthquake, no collapse under major eartkquake” stipulated in the China design code. It also presents calculation results of 3 practical tall building structures to show the application of the method.

### [关键词]

建筑结构，地震作用，屈服判别法，薄弱部位

### Key Words

Building structure, Seismic Action, Yield prediction method, Weak member

## 一、引言

我国早期建筑抗震设计规范<sup>[1]</sup>，基本上采用当时国外相关规范的做法，对弹性地震作用通过结构系数 C 折减后，仅进行强度验算并采用构造措施满足结构延性的要求。我国 1976 年唐山大地震使整个唐山市顷刻间夷为平地，伤亡极其惨重，因而在编制 1989 年《建筑抗震设计规范》GBJ10-89<sup>[2]</sup>时，提出了“小震不坏，中震可修，大震不倒”的抗震设防目标，相应地提出了建筑结构的变形计算方法，结构抗扭转设计方法，并要求按不同抗震等级采取相应的构造措施，对某些重要建筑物还提出了采用“结构在罕遇地震作用下薄弱层（部位）弹塑性变形”进行分析验算，对于防止结构倒塌起到了重大作用。2002 年新颁布的《建筑抗震设计规范》（GB50010-2002）<sup>[3]</sup>仍采取了与 89 规范相同的抗震设防目标，但两本建筑抗震设计规范在抗震设计计算中都还存在以下两个问题：

1、没有对地震作用下结构存在的薄弱构件进行分析而作出专门的设计规定，仅对框架类剪切型结构适用的薄弱层作出了一些规定。这是远远不能满足设计实践要求的。有时还容易带来概念的混淆。

2、在中震（设防烈度地震）作用下，规范仅提出了“中震可修”的概念性要求，而没有具体规定抗震设计方法，这对于超越概率达 10%的设防烈度地震而言显然是不够的。

针对以上所述，本文提出了建筑抗震设计的“屈服判别法”，以判别构件是否屈服，何时屈服及何种性质的屈服，作为检查和掌握所设计结构实际的抗震能力的依据，从中可以找出结构的最薄弱构件的位置及其屈服性质，并提出出现屈服时地震作用的大小，这样设计时

就可遵从抗震设计原则，如构件过早出现屈服，则应适当加强，推迟屈服的出现，这对防止结构在大震作用下的倒塌有利，同时不允许先出现脆性破坏的抗剪屈服或危及结构安全的抗拉或压屈等破坏，以更好地保证结构的抗震安全性，满足抗震规范规定的抗震设防目标的要求。本文将建议在抗震设防烈度地震作用下主要受力构件，如竖向构件不允许出现屈服，对于可起耗能作用的连梁等梁类构件或其它次要构件，则可允许出现轻微屈服，这样的设计方法可通过适当量化的计算方法更好体现“中震可修”的要求，与小震和罕遇地震作用下抗震设计规定相结合，就能更好地整体实现“小震不坏，中震可修，大震不倒”的抗震设防目标。

结构在罕遇地震作用下诸多构件已进入屈服，其计算需采用考虑结构弹塑性的分析方法，虽然从美国 R.Clough 教授发表第一篇剪切型结构的弹塑性地震反应分析的论文以来，已经历了 40 余年的研究，但动力弹塑性分析方法至今仍不够成熟，即使是静力弹塑性分析方法（推复分析法）技术上相对发展的较为成熟和实用<sup>[4]</sup>，但计算工作量仍然繁重，技术难度也较大，因而在实践中推广应用仍有一定难度。但本文提出的屈服判别法则是要求寻找最薄弱构件屈服的出现，结构总体上仍处于弹性状态，因而本法在地震作用下的计算可近似采用与小震作用时相同的弹性计算方法，这使本法在工程界的推广应用提供了便利条件。

## 二、薄弱层与薄弱构件

1972 年美国费南多（San fernado）地震中，奥利夫医院（Olive Hospital）一座上部剪力墙下部框架的多层建筑由于底层钢筋混凝土柱抗弯强度不足，导致结构底层变形极大而局部倒塌。

不久后 1976 年唐山大地震一次强余震后，天津一座三层钢筋混凝土框架厂房结构由于二层钢筋混凝土柱抗弯屈服而导致整个结构倒塌，二层柱由于塑性变形被弯曲成 S 形。

这两个在大地震中倒塌的著名案例，使结构工程师们认识到结构中存在着薄弱层的危险性，应在结构抗震设计中采取措施予以防止。

随后进行的单层结构、多层框架结构及多层剪切型结构的弹塑性理论分析研究中，确认了薄弱层一旦在地震作用下进入屈服，则可能在薄弱层产生大的塑性变形集中，从而导致结构倒塌<sup>[5][6]</sup>，某一层进入屈服的标志是地震作用下该楼层的剪力已超过了该楼层的抗剪屈服强度。对于多层框架结构而言，可用公式表示如下

$$V_{yi} < V_{ei} \quad (1)$$

$$V_{yi} = \sum_j V_{yji} = \sum_j \frac{M_{yji}^T + M_{yji}^B}{h_i} \quad (2)$$

式中， $V_{ei}$  为该层在水平地震作用下的弹性地震剪力； $V_{yi}$  为楼层  $i$  所有柱抗弯屈服时形成的抗剪承载力， $M_{yji}^T$ 、 $M_{yji}^B$  分别为  $i$  层第  $j$  柱上下端抗弯屈服强度。

对多层剪切型剪力墙结构而言，则仍可用上述公式表示，但  $i$  层墙体的抗剪承载力可根据《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ3-2002）<sup>[7]</sup> 中有关剪力墙抗剪承载力的公式确定。

由此可见，如定义首先进入屈服的楼层为薄弱层，则以剪力比之最小值  $(V_{yk}/V_{ek})_{\min}$  可

定义出薄弱层*i*之位置，用公式表示如下：

$$V_{yi}/V_{ei} < (V_{yk}/V_{ek})_{k=1,\dots,i-1,i+1,\dots,n} \quad (3)$$

理论研究表明，即使是剪切型的多层框架，在水平地震作用下也不是某一薄弱层的所有柱或竖向构件同一瞬间进入屈服；而是某根或某几根最薄弱柱先行屈服，在地震继续作用下，其它柱随之而造成该楼层整个屈服而导致倒塌。进一步的研究分析表明，对于各剪力墙为弯剪型受力的高层框剪框筒等结构，剪力墙本身可能根据受力的不同及配筋构造的差异出现受弯屈服或受剪屈服，在保证强剪弱弯的设计原则下，当某道剪力墙首先出现受弯屈服，则在地震作用继续加大时，其它构件将随之之逐步屈服，不同结构各有其自身特有的屈服发展和塑性内力重分布规律，并不一定造成与同层其它墙柱一起出现整体屈服而形成“薄弱层”。由此可见，薄弱层的概念不可任意套用。更为重要和更为一般的设计原则应是找出结构最先屈服的薄弱构件，即 $(V_{yij}/V_{eij})_{\min}$ 和 $(M_{yij}/M_{eij})_{\min}$ 所在位置及屈服的性质，用式表示如下

$$V_{yij}/V_{eij} < (V_{ykl}/V_{ekl})_{k=1,\dots,i-1,i+1,\dots,n;l=1,\dots,m} \quad (4)$$

$$M_{yij}/M_{eij} < (M_{ykl}/M_{ekl})_{k=1,\dots,i-1,i+1,\dots,n;l=1,\dots,m'} \quad (5)$$

式中，*m*为楼层竖向构件的根数；*m'*为含梁在内的构件根数。

综上所述，在地震作用下，一座建筑结构总是存在一个最薄弱的构件，它在地震作用下首先进入屈服（抗弯或抗剪），然后出现塑性内力重分布，内力的转移可能是横向转移为主，也可能是竖向转移为主，也可能出现双向同时重大转移。薄弱层一般仅在中层剪切型的框架、框剪结构内出现，它是薄弱层某根竖向构件屈服后，内力横向转移为主导致整个楼层屈服而出现倒塌。

### 三、屈服判别法原理与计算方法

屈服判别法是建筑结构抗震设计中一个新的方法，它是基于找出结构最先出现屈服的薄弱构件，并判断中震作用下结构可能的损坏程度是否满足“中震可修”的抗震设防目标的一个量化的设计计算方法，是对规范目前抗震设计方法的一个补充和发展。

#### （一）、基本原理

结构在地震作用下的反应与地震作用的大小息息相关，当地震作用较小时，结构处于弹性阶段工作，地震逝去后结构恢复原状。但当地震作用逐步增大时，结构总存在一处或几处最薄弱的构件最先达到屈服而进入塑性状态，对那些构件，在受力不增大的情况下，位移将明显增大，从而导致结构塑性内力重分布，甚至塑性变形集中而带来结构倒塌的危险。

现行抗震设计方法的强度验算是基于小震作用下进行的，设计时采用的地震影响系数见表1。同时通过分项系数，采用材料强度设计值，并对薄弱部位的构件内力采用放大系数等措施提高结构或部分较危险结构构件承载力的抗震安全性。规范并规定按不同抗震等级采用相应的构造措施以加强结构构件的延性，防止大震下的倒塌。但这样设计后，设计者对所设计的结构，哪里是最容易出现屈服的薄弱部位，哪里是最先屈服的构件，屈服的性质是什么，

以及多强地震作用下开始出现屈服仍是未知的。屈服判别法就是在小震下结构设计计算的基础上，通过逐步增大地震作用仍然采用弹性分析法来计算结构的内力效应  $S_e$  与构件相应的屈服强度  $R_y$  进行比较，当前者大于后者，表示该构件已屈服，两者相等时可认为该构件进入屈服。计算中地震作用的增大是通过地震影响系数的逐步增大来体现的，表 1 是屈服判别法在不同设防烈度水平地震作用下，地震影响系数最大值  $a_{max}$  分段取值的建议。如工程提供了实际场地的地震影响系数，则应取用所提供的多遇地震、设防烈度地震下相应的地震影响系数，屈服判别地震作用 1、2 的地震影响系数可相应插值求得。

表 1

| 地震影响       |   | 7 度         | 8 度         | 9 度  | 屈服许可                              |
|------------|---|-------------|-------------|------|-----------------------------------|
| 多遇地震       |   | 0.08 (0.12) | 0.16 (0.24) | 0.32 | 不得屈服<br>(可查找相对薄弱部位)               |
| 屈服判别<br>地震 | 1 | 0.16 (0.24) | 0.32(0.42)  | 0.50 | 不得屈服<br>(可查找相对薄弱部位)               |
|            | 2 | 0.20 (0.28) | 0.38(0.50)  | 0.60 | 次要及可耗能构件允许<br>出现很轻微屈服             |
| 设防烈度地震     |   | 0.23 (0.32) | 0.45 (0.60) | 0.70 | 竖向构件不得屈服，次要<br>及可耗能构件允许出现<br>抗弯屈服 |

注：括号内数值分别用于设计基本加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区。

## (二)、计算方法

### 1、地震作用的计算

《建筑抗震设计规范》(GB50010-2002) 第 5.4.1 条规定，“结构构件的地震作用效应和其他荷载效应的基本组合，应按下式计算：

$$S = g_G S_{GE} + g_{Eh} S_{Ehk} + g_{Ev} S_{Evk} + f_w g_w S_{Wk} \quad (6)$$

其中， $S$  为结构构件内力组合的设计值，包括组合的弯矩、轴向力和剪力设计值； $S_{GE}$  为重力荷载代表值的效应； $S_{Ehk}$  为水平地震作用标准值的效应； $S_{Evk}$  为竖向地震作用标准值的效应； $S_{Wk}$  为风荷载标准值的效应； $f_w$  为风荷载组合值系数，一般结构取 0.0，风荷载起控制作用的高层建筑应采用 0.2； $g_G$ 、 $g_{Eh}$ 、 $g_{Ev}$ 、 $g_w$  分别为重力荷载、水平、竖向地震作用以及风荷载的分项系数，在屈服判别法中，所有分项系数均取为 1.0；且地震作用的增大系数或调整系数均取 1.0，由此得，

$$S_E = S_{GE} + S_{Ehk} + S_{Evk} + f_w S_{Wk} \quad (7)$$

式中， $S_E$  为弹性计算求得的构件内力组合的标准值。

### 2、构件抗屈服承载力计算

构件抗屈服承载力的计算按《混凝土结构设计规范》(GB50009-2002) [8] 的有关公式进行，但其中混凝土强度、钢材强度均用标准值。

### 3、屈服判别法

按下式判断结构构件是否屈服

$$S_E \geq R_y \quad (8)$$

式中， $S_E$ 为弹性计算求得的构件内力组合的标准值； $R_y$ 为构件抗屈服承载力标准值。当 $S_E \geq R_y$ 表示构件屈服，在多遇地震作用下一般不会出现构件屈服，但相应计算结果可有助于查找实际的相对薄弱部位，它们很可能已不是在小震设计时，已采取规范加强措施（如放大系数）的薄弱部位。在计算设防烈度地震作用时，先试算屈服判别 1，2 作用，按式（8）判别有无构件出现屈服，是何种性质的屈服。根据规范抗震设计原则，建议计算结果应符合如下要求：

1)、小震和屈服判别地震 1 作用下，不出现构件屈服，但可查找出真正的薄弱部位；

2)、屈服判别地震 2 作用下，竖向构件不出现屈服，次要构件或可耗能构件不出现剪切破坏，不宜出现抗弯屈服；

3)、在中震作用下，竖向构件不出现屈服，次要构件或可耗能构件允许出现轻微弯曲屈服，不出现剪切破坏；

当计算中发现上述要求不能满足时，应改进截面加强配筋，重新计算达到满足要求为止。

显而易见，采用上述屈服判别法可以达到以下目的：

1)、找出结构在多大地震作用下，是哪一个构件最先出现屈服，该构件屈服的性质是抗弯屈服，抗剪屈服还是抗拉或压屈破坏。从而可找出结构构件是过早还是过迟出现屈服，并可找到结构真正的薄弱环节，有针对性地采取措施使之满足“强柱弱梁、强剪弱弯”的抗震设计原则，更好地满足结构抗震安全性的要求。

2)、根据设防烈度地震作用下屈服判别的计算结果，如能满足上述设计要求，只允许次要构件或可耗能构件出现轻微弯曲屈服，因而可以相对量化地判断设计是否满足抗震设计规范“中震可修”的抗震设防目标。

## 四、工程实例

### （一）、工程实例一（框筒结构）

#### 1、工程概况

本工程主体结构共 53 层，地下 3 层，地面以上 50 层，高度 189.3m。地下一～三层为停车库、设备用房、人防工程及部分商业用房；地面以上 1～5 层为商业用房，6～26 层为公寓用房，27 层以上为办公用房。结构标准层平面布置如图 1 所示。该结构主体结构为超 B 级高度，结构体系采用框架—核心筒体，抗震设防烈度为 7 度，设计地震分组为第一组，设计基本地震加速度为 0.10g，场地类别为 II 类。

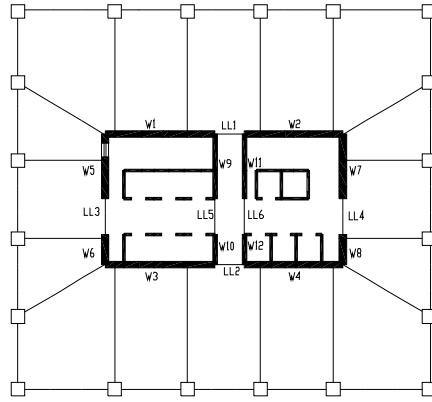


图 1 结构标准层平面布置简图

2、各阶段地震作用下结构构件屈服情况

- 1)、多遇地震作用下 ( $a_{max} = 0.08$ ) 框架柱、框架梁、墙体、连梁等均不屈服;
- 2)、屈服判别地震 1 作用下 ( $a_{max} = 0.16$ ) 框架柱、框架梁、墙体、连梁等均不屈服;
- 3)、屈服判别地震 2 作用下 ( $a_{max} = 0.20$ ) 框架柱、框架梁、墙体、均不屈服, 部分连梁屈服情况见表 2。

表 2  $a_{max} = 0.20$  时连梁屈服情况表

| 超限所在楼层 | 构件编号    | 屈服类别              |
|--------|---------|-------------------|
| 7~32   | LL1、LL2 | 抗剪屈服, 采取措施改变为抗弯屈服 |

- 4)、设防烈度地震作用下 ( $a_{max} = 0.24$ ) 框架柱、框架梁均不屈服, 此外个别墙体出现抗弯屈服, 需采取措施增强其抗弯承载力, 使之不出现屈服, 见表 3; 连梁屈服情况增多, 见表 4, 并出现抗剪屈服的不利结果, 经采取措施加强其抗剪承载力, 改变为抗弯屈服。

表 3  $a_{max} = 0.24$  时墙体屈服情况表

| 超限所在楼层 | 构件编号 | 屈服类别 |
|--------|------|------|
| 3      | W5   | 抗弯屈服 |

表 4  $a_{max} = 0.24$  时连梁屈服情况表

| 超限所在楼层  | 构件编号        | 屈服类别              |
|---------|-------------|-------------------|
| 3       | LL1         | 抗剪屈服, 采取措施改变为抗弯屈服 |
| 3、4、6、7 | LL1、LL2     | 抗剪屈服, 采取措施改变为抗弯屈服 |
| 8       | LL1、LL2、LL4 | 抗剪屈服, 采取措施改变为抗弯屈服 |

|       |         |                   |
|-------|---------|-------------------|
| 9~23  | LL1~LL4 | 抗剪屈服, 采取措施改变为抗弯屈服 |
| 24~48 | LL1、LL2 | 抗剪屈服, 采取措施改变为抗弯屈服 |

### 3、结论

从以上屈服判别分析可以得出以下结论:

1)、本工程基本满足屈服判别法所允许的屈服破坏范围及屈服性质, 但尚存在一些需改进之处。

2)、从分析结果可以看出, 水平构件连梁的屈服较早出现, 在防烈度地震作用下连梁屈服的楼层及屈服数量增多, 且为抗剪屈服, 因此必须采取措施, 选择连梁截面配筋构造, 增加其抗剪承载力, 使构件满足“强剪弱弯”要求。

3)、个别墙体在设防烈度地震作用下出现抗弯屈服是不利的, 因此应增加墙体的抗弯承载力, 如增加墙体端柱的配筋率、提高端柱纵筋钢筋级别、端柱内配置芯柱或型钢等方法提高墙体的抗弯承载力。

#### (二)、工程实例二 (剪力墙结构)

##### 1、工程概况

某公寓楼主体结构地上 48 层, 地下 4 层, 屋面高度约 168m, 采用钢筋混凝土剪力墙结构体系, 为超 B 级高度的高层建筑。抗震设防烈度为 7 度, 设计地震分组为第一组, 场地类别为 II 类。其标准层结构平面布置图见图 2。

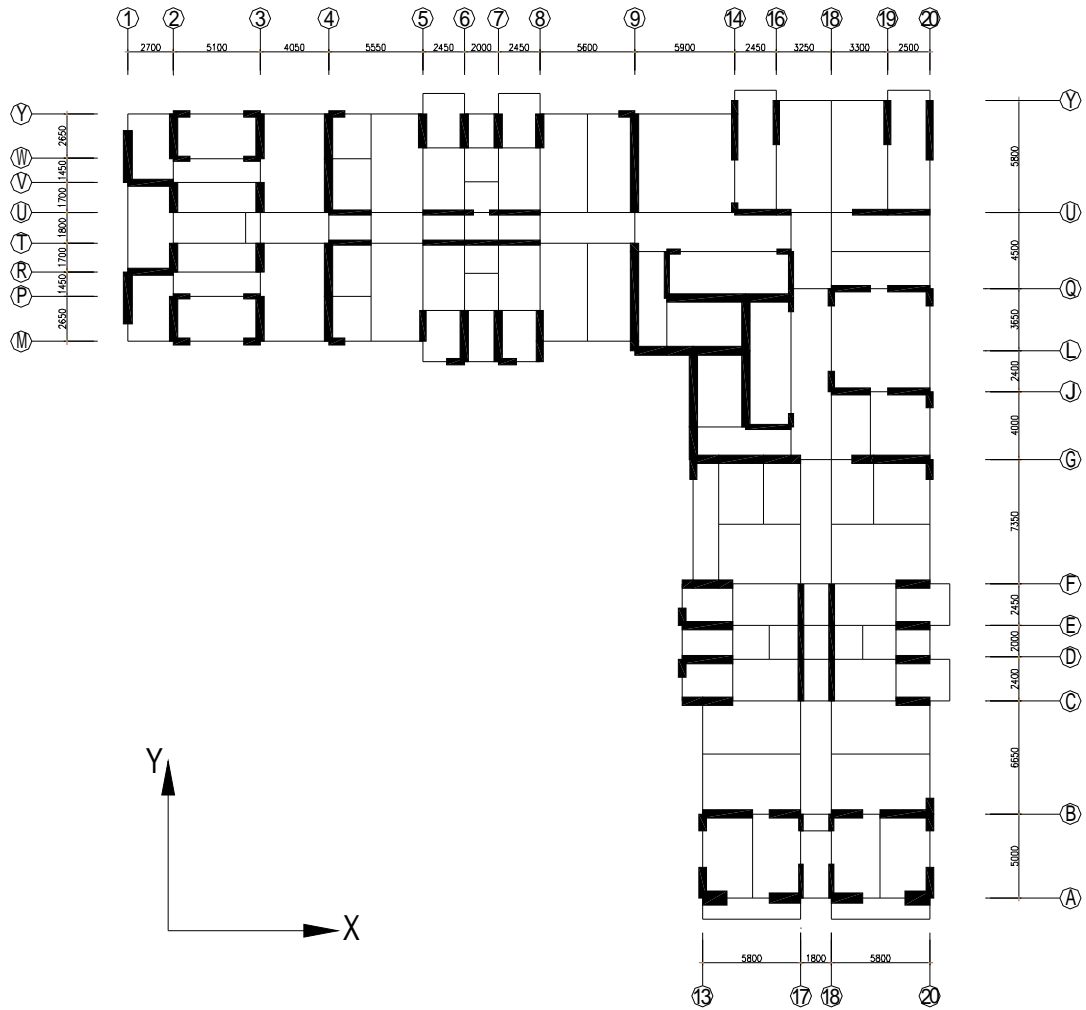


图2 结构标准层平面布置简图

## 2、屈服判别法分析结果及结论

1)、在多遇地震作用下，所有构件均不屈服。

2)、在低于设防烈度地震作用下时，少数连梁出现抗弯屈服；在设防烈度地震作用下时，较多楼层的较多连梁出现抗弯屈服，随后部分底部剪力墙出现抗弯屈服。将出现抗弯屈服的连梁的配筋率适当提高，可达到连梁在设防烈度地震作用下不出现屈服，对提高结构的抗震性能是有利的。根据计算当连梁配筋率提高至构件的最大配筋率 2.5%时，当地震作用略高于设防烈度， $a_{\max}$  约为 0.30 时，才会出现连梁抗弯屈服。

3)、设防烈度地震作用下时，底层边、角部剪力墙出现拉力，这是当前超高层建筑抗震设计中应特别注意解决的问题，本工程已采取适当措施予以加强。

## (二)、工程实例三（高位框支剪力墙结构）

### 1、工程概况

某工程地下 2 层，地上裙房 8 层为商场，上部为 16 层住宅，结构转换层位于 8 层顶（9 层楼面），为带高位转换层的部分框支剪力墙超限结构，抗震设防烈度为 7 度，设计地震分

组为第一组，场地类别为 II 类。裙房结构平面见图 3a，标准层结构平面见图 3b。

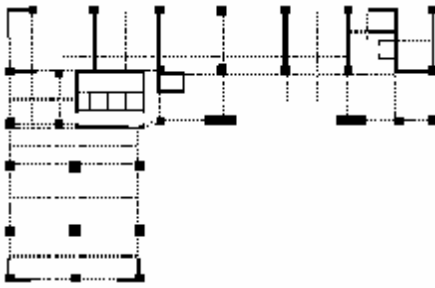


图 3a 裙房结构平面布置图

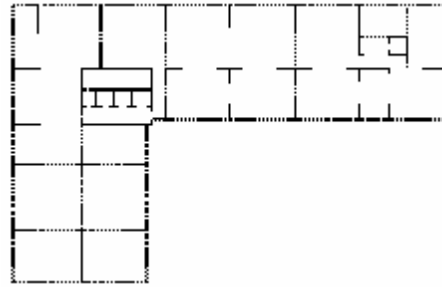


图 3b 标准层结构平面布置图

## 2、屈服判别法分析结果及结论

1)、在多遇地震作用及屈服判别地震 1 作用下，所有构件均不屈服。

2)、在屈服判别地震 2 作用下，转换层及转换层以下墙柱、转换梁、框架梁等均不屈服，但在转换层上部 1 至 4 层内部分连梁出现抗剪屈服，这一结果清楚表明，由于高规对转换梁框支柱的抗震设计采取多项加强措施，显著放大了内力系数，使得转换层和框支柱已不再是结构在地震作用下的薄弱部位，出现了结构薄弱部位上移，因而找出结构真正的薄弱部位对结构的抗震安全性有重要的实际意义。

3)、设防烈度地震作用下时，仍未出现转换层下部落地墙、框支柱及转换梁、框架梁的屈服，但较多楼层的较多连梁出现抗剪屈服，因此必须采取措施，选择连梁截面配筋构造及提高混凝土强度等级，增加其抗剪承载力，使构件满足“强剪弱弯”要求。此外转换层以上几层的剪力墙还出现了抗剪抗弯屈服，显然剪力墙作为主要竖向构件过早屈服是不允许的，因此应加强转换层以上若干层剪力墙及与之相连的连梁的截面配筋构造措施，以推迟其屈服的出现，并满足“强剪弱弯”抗震设计原则，才能改善整个结构的抗震安全性。

## 五、结论

采用屈服判别法主要优点可归纳如下：

1、可以揭示按规范规定的小震作用设计的结构的实际薄弱部位，薄弱性质和薄弱程度，从而可有针对性地予以加强。这是现行设计方法的明显改进。

2、可发现结构薄弱构件屈服对应的地震作用大小，如过早屈服，可采取措施加强，推迟其屈服的出现；如发现屈服性质是脆性的剪切破坏，则可采取措施改变为延性的抗弯屈服，符合规范“强剪弱弯”的设计要求；如发现受压墙柱失稳或出现受拉，则应采取可靠安全措施解决。

3、设防烈度地震作用下不允许结构出现屈服或不允许结构的主要竖向受力构件出现屈服，仅许可部分次要构件或耗能构件出现轻微屈服，相对定量地满足“中震可修”的抗震设防要求。

4、屈服判别法可近似采用小震作用下的弹性分析方法，使用方便，计算简明，便于为广大结构设计工程师掌握和接受，有利于本法的推广应用。

总之屈服判别法的提出，使抗震设计在量化地全面实现建筑抗震设计规范规定的“小震不坏，中震可修，大震不倒”的抗震设防目标前进了一步。

通过以上论述和工程案例的应用，说明屈服判别法对改善结构抗震设计提高结构抗震性能具有重要意义，是对规范规定设计方法的一个补充和发展。

#### 参 考 文 献

- [1]、工业与民用建筑抗震设计规范（TJ11-78），中国建筑工业出版社，1978。
- [2]、建筑抗震设计规范（GBJ11-89），中国建筑工业出版社，1989。
- [3]、建筑抗震设计规范（GB50011-2001），中国建筑工业出版社，2001。
- [4]、魏琏，王森，王志远，静力弹塑性分析方法（Push-over）及其在抗震设计中的应用，建筑结构（待发）。
- [5]、魏琏，钢筋混凝土高层建筑抗震设计手册，地震出版社，1991。
- [6]、魏琏，高层建筑结构位移控制研讨，建筑结构，2000.6。
- [7]、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。
- [8]、混凝土结构设计规范（GB50010-2002），中国建筑工业出版社，2002。