

# 建筑结构抗震性能设计方法研讨

王森, 孙仁范, 韦承基, 魏琰

(深圳市力鹏工程结构技术有限公司, 深圳 518034)

[摘要] 简要介绍了近百年来建筑结构抗震设计方法的历史演进, 对现行规范规定的抗震性能设计方法进行了讨论, 提出一些补充建议, 如补充与规范抗震设防标准一致的性能目标, 区分多遇地震与设防烈度地震下的性能水准 1, 对关键构件进行单独设计, 根据不同结构类型提出对应的细化的构件性能目标要求等。

[关键词] 抗震性能设计; 性能水准; 性能目标

中图分类号: TU318.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2014)06-0018-05

## Study on performance based seismic design methods for building structure

Wang Sen, Sun Renfan, Wei Chengji, Wei Lian

(Shenzhen Li Peng Structural Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China)

**Abstract:** The gradual progress of seismic design methods for building structures in recent hundred years is briefly introduced. Discussion were made on performance based seismic design method in current Chinese design codes and some supplementary suggestions were put forward, such as supplementing the seismic performance standard corresponding with the code fortification targets, distinguishing the performance level 1 under frequent earthquake and medium earthquake, designing the key members independently, proposing refinement performance target of different members depending on the structure type.

**Keywords:** performance based seismic design; performance level; performance target

## 0 引言

近百年来建筑结构抗震设计方法的研究和进展, 已从最早的静力侧力法逐步发展到考虑地震地面运动特征和结构自身动力特性的反应谱法, 进而发展到抗震性能设计方法, 使得建筑结构抗震设计既反映了地震作用的随机性, 考虑了小震、中震、大震不同水准地震作用下结构的受力、变形和损伤状况, 又可根据不同要求和结构中不同构件对结构安全所起的作用区别对待, 采取有针对性的分析和抗震措施, 做到建筑结构抗震设计既安全又经济合理, 其意义是十分重大的。

近百年来, 建筑结构抗震设计方法在总结震害、大量科学研究成果的基础上取得了长足的进展, 通过对现行规范规定的抗震性能设计方法进行讨论, 提出了若干补充建议。

## 1 建筑结构抗震设计方法的历史演进

建筑结构抗震设计方法的研究始于 20 世纪初, 回顾近百年来建筑结构抗震设计方法的历史演进, 可大体将相关国家抗震设计规范中抗震设计方法的发展划分为三个阶段。

### 1.1 第一阶段

20 世纪初, 1906 年 4 月 18 日美国旧金山发生的里氏 7.8 级大地震和 1923 年 9 月 1 日日本东京发生的里氏 7.9 级大地震, 都造成了巨大的地震灾

害。为了抵御和减轻地震灾害, 美国、日本等国的科学家对建筑结构的抗震能力和地震对建筑物造成灾害的原因进行了研究。日本在 1924 年制定规范时, 对结构施加侧向静水平力, 以模拟水平地震作用, 将此侧向静水平力大小取为结构重量的一个较小比例, 如取为  $0.1W$ ,  $W$  为结构重量,  $0.1W$  即为模拟的水平地震作用。美国在同时期也采用类似的方法进行结构抗震设计, 但所取的侧力系数略有差异, 这种方法被称为静力侧力法, 它说明了地震造成结构破坏的主要原因为水平地震作用。这一阶段的抗震设计方法可称为第一代抗震设计方法。

### 1.2 第二阶段

1933 年美国利用强震仪在 Long Beach 地震中测到了世界第一条强地面运动加速度, 1940 年 5 月 18 日又在 Imperid Valley 地震中记录到至今仍在广泛应用的著名的 El Centro 水平地面加速度时程曲线, 并应用结构动力学理论获得了相应的反应谱曲线。由此人们认识到结构在地震作用下所受到的水平力并不是一个恒定的静力荷载, 而是与地震时地面运动特征和结构自身的动力特性密切相关, 从而开辟了应用反应谱理论进行结构设计的新篇章。

进一步的研究发现, 采用弹性反应谱曲线进行结构抗震分析时的地震作用很大, 因此设计时需折

作者简介: 王森, 博士, 高级工程师, Email: ws2001622@163.com。

减地震力来进行结构抗震设计,主要的依据是地震作用较大时结构将进入弹塑性状态,地震作用将适当减小。美国、日本等许多国家都基于这一原则确立了规范的抗震设计方法,制定了相应的抗震构造措施,以保证结构的延性。

我国1974年版及1978年版的抗震设计规范<sup>[1-2]</sup>也是采用这种反应谱理论来进行抗震设计,单质点结构地震力计算公式为:

$$Q = C\alpha_T W$$

式中符号含义见规范<sup>[1-2]</sup>。

对于多自由度体系,采用基底剪力法或振型分解法进行抗震设计,公式中均有结构系数 $C$ ,以反应结构进入塑性状态后对地震力的折减。此外,规范<sup>[1-2]</sup>还规定了在不同抗震设防烈度下结构应采取的相应的抗震构造措施。

上述折减后的地震作用其实是结构在经受较小地震时的弹性地震作用。由于同一地区的地震抗震设防烈度相同,不同类结构应该承受一致的地震作用,但从上述公式可知,不同结构类型的结构系数 $C$ 不同,因此结构承受的弹性地震作用也不同。这一阶段的抗震设计方法可称为第二代抗震设计方法。

第一代和第二代抗震设计方法都没有充分地考虑到地震的随机性,以及一旦发生高烈度地震时可能对结构带来的危害。

### 1.3 第三阶段

鉴于唐山等大地震的惨痛历史教训,人们体会到了地震的随机性,充分认识到只有采取抗震构造措施增强建筑物的抗震能力,防止大地震作用下建筑物的倒塌才是建筑结构抗震设计的根本目的。基于此,我国学者魏琰等<sup>[3]</sup>提出建筑抗震设计时应区分小震、中震、大震,分别进行抗震设计的概念,要求小震时结构处于弹性状态,取消结构延性系数 $C$ ,结构内力可以线性组合;大震时结构进入弹塑性状态,应对结构进行弹塑性分析。相应的抗震设防目标明确为“小震不坏,中震可修,大震不倒”。因此小震时可按弹性线性理论进行分析;中震时通过小震设计和抗震构造措施,做到中震可修;大震时通过弹塑性层间变形验算及抗震构造措施,达到防止结构倒塌的目的。这一方法在1989年版抗规中得到了充分体现<sup>[4]</sup>,其基本原则一直沿用至今,得到国内外同行的广泛肯定。当时这一方法的不足主要是:1)对中震没有量化的设计方法;2)将大震验算仅作为弹塑性层间变形验算也是不够的。文献[5]为量化中震抗震分析提供了解决途径。而近十年来,弹塑性静力和动力分析软件的迅速发展使得考虑小震、

中震、大震的抗震设计方法更加完善,实际上这一方法为抗震性能设计方法的确立和应用奠定了基础,比第二代抗震设计方法更为安全、合理。

2010年我国颁布了《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[6]</sup>(简称抗规)及《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)<sup>[7]</sup>(简称高规),且结构抗震性能设计方法已被纳入这两本规范,并得到了进一步的发展和完善,可称为第三代抗震设计方法。

### 2 规范关于结构抗震性能设计方法的有关规定

抗规和高规均规定了抗震性能设计方法,明确了抗震性能水准、抗震性能目标和具体的计算方法。高规第3.11.1条将结构抗震性能目标分为A、B、C、D四个等级,将结构抗震性能水准分为1、2、3、4、5五个水准,各抗震性能目标均与一组在指定地震作用下的结构抗震性能水准相对应。高规第3.11.2条给出了结构抗震性能水准的宏观判别。

抗规有与高规基本一致的相关规定。在执行过程中,发现现行抗震性能设计方法尚存在以下几个问题有待解决:

(1)上述性能设计中的性能目标,缺少与1989年版抗规及现行规范一致的设防目标。性能目标C:在小震、中震、大震时分别对应性能水准1、3、4,小震时的水准1、中震时的水准3与高规中的设防目标一致,但大震时的水准4“修复或加固后可继续使用”,显然比高规中的大震设防目标高。性能目标D:小震、中震、大震分别对应性能水准1、4、5,小震水准1与高规一致,中震性能水准4“修复或加固后可继续使用”,明显低于高规中的中震的“一般修理继续使用”的设防目标,大震水准5基本与高规中的大震一致。目前许多业主和设计单位都认为D级性能目标偏低,而采用C~D级性能目标及性能水准1、3、5进行抗震设计。

为此建议增加一个性能目标 $D^*$ ,其小震、中震、大震的性能水准分别为性能水准1、3、5,这样可与1989年版抗规及现行规范的设防目标一致,这也与当前一些设计单位的实践做法一致。

(2)多遇地震时性能水准1与设防烈度地震时的性能水准1的涵义是不同的,应加以区别。建议用性能水准 $1^*$ 表示多遇地震,它除应满足弹性设计要求外,其验算公式还含有与抗震等级有关的增大系数及其他内力增大系数,因此它比弹性设计有更高的安全度。在设防烈度地震时,用性能水准1表示满足弹性设计要求,但相应验算公式不含有与抗震等级有关的增大系数及其他内力增大系数,

(3)对关键构件宜允许单独进行性能设计。对

于某些致命的构件,不必与整个结构的性能目标一致,可单独进行性能设计。例如某一高层建筑,建筑要求在角部仅用一根柱子支承上部几十层建筑,而该柱又有6层楼高,如果整个结构采用性能目标C进行设计时,关键构件在罕遇地震时性能状况应为轻度损坏,但实际设计时在罕遇地震下该柱宜处于弹性状态以确保安全,因此该柱可单独进行性能设计,而不受整个结构性能目标的限制。反之次要构件,也允许采用比整个结构性能目标略低的性能目标进行设计。总之,采用性能设计时应更加灵活地应用,随不同构件设计的需要采用相应的性能水准。

(4) 建议补充不同结构类型的性能目标,有利于不同设计单位在设计时统一标准。建议列出各种不同类型结构在不同水准时构件的性能状态。

(5) 抗震构造措施。抗震构造措施是针对强地震作用下结构进入弹塑性状态,结构应有足够的延性才能抵御大地震袭击而采取的。在实际高层建筑设计中很少选用性能目标A、B,当结构条件符合性能目标A、B时,因大震下主要受力构件仍处于或接近弹性阶段,因此应对抗震构造措施的作用进行研究,区别对待:1) 对于6、7度烈度区,考虑到中长期预报尚未过关,原定烈度地区发生高于该烈度的大地震的案例很多,建议抗震构造措施不降低;2) 对于8度及8度以上高烈度区,除特别重要和在地震时需要维持正常运行功能的建筑外,其他建筑的抗震构造措施建议按降低1度采取;3) 对特别重要和在地震时需要维持正常运行功能的建筑,除构造措施不降低外,并建议用特大震,即高1度大震,进行弹塑性性能复核。采用性能目标C、D<sup>\*</sup>、D时,抗震构造措施仍然按照常规设计的有关规定采用而不再降低。

3 抗震性能设计方法补充建议

3.1 性能目标与性能水准

结构抗震性能目标分为A、B、C、D<sup>\*</sup>、D五个等级,结构抗震性能水准分为1<sup>\*</sup>、1、2、3、4、5六个水准(表1),各性能目标均与一组在指定地震作用下的结构抗震性能水准相对应。

| 结构抗震性能目标 表 1 |         |                |                |                |                |                |
|--------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 性能目标         |         | A              | B              | C              | D <sup>*</sup> | D              |
| 地震水准         | 多遇地震    | 1 <sup>*</sup> | 1 <sup>*</sup> | 1 <sup>*</sup> | 1 <sup>*</sup> | 1 <sup>*</sup> |
|              | 设防烈度地震  | 1              | 2              | 3              | 3              | 4              |
|              | 预估的罕遇地震 | 2              | 3              | 4              | 5              | 5              |

注:性能水准1<sup>\*</sup>的结构,应满足弹性设计要求,其承载力和变形应符合有关规程<sup>[7]</sup>的规定;性能水准1,应满足弹性设计要求,其验算公式不含有与抗震等级有关的增大系数及其他的内力增大系数。

3.2 结构抗震性能水准

结构抗震性能水准可按表2进行宏观判别。

| 各性能水准结构预期的震后性能状况 表 2     |        |      |          |               |             |
|--------------------------|--------|------|----------|---------------|-------------|
| 结构抗震性能水准                 | 宏观损坏程度 | 损破部位 |          |               | 继续使用的可能性    |
|                          |        | 关键构件 | 普通竖向构件   | 耗能构件          |             |
| 1 <sup>*</sup>           | 完好     | 无损坏  | 无损坏      | 无损坏           | 不需修理即可继续使用  |
| 1(安全度较1 <sup>*</sup> 略低) |        |      |          |               |             |
| 2                        | 基本完好   | 无损坏  | 无损坏      | 轻微损坏          | 稍加修理即可继续使用  |
| 3                        | 轻度损坏   | 轻微损坏 | 轻微损坏     | 轻度损坏、部分中度损坏   | 一般修理后可继续使用  |
| 4                        | 中度损坏   | 轻度损坏 | 部分中度损坏   | 中度损坏、部分比较严重损坏 | 修复或加固后可继续使用 |
| 5                        | 比较严重损坏 | 中度损坏 | 部分比较严重损坏 | 比较严重损坏        | 需排除大修       |

注“关键构件”是指该构件的失效可能引起结构的连续破坏或危及生命安全的严重破坏。“普通竖向构件”是指“关键构件”之外的竖向构件。“耗能构件”包括框架梁、剪力墙连梁及耗能支撑等。

3.3 各类结构的抗震性能目标

为使用方便,结构抗震性能目标可按结构类型改写为表3~7,其中性能目标C、D<sup>\*</sup>、D所对应的性能水准按表1选取。表3~8中:1)量词“个别”为小于10%，“部分”为20%左右，“较多”为30%左右，“大部分”为50%左右，“普遍”为75%左右;2)多遇地震下弹性加“\*”表示与设防烈度地震下的弹性进行区别;3)不屈服指截面内钢筋应力低于屈服强度标准值。

| 框架结构抗震性能目标 表 3 |                |                             |                 |                |
|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------|----------------|
| 结构构件           |                | 多遇地震<br>(水准1 <sup>*</sup> ) | 设防烈度地震<br>(水准3) | 罕遇地震<br>(水准5)  |
| 关键构件           | 在同一楼层数量相当的各长短柱 | 弹性 <sup>*</sup>             | 不屈服<br>抗剪弹性     | 不屈服            |
| 普通竖向构件         | 框架柱            | 弹性 <sup>*</sup>             | 不屈服<br>抗剪弹性     | 部分屈服           |
| 耗能构件           | 框架梁            | 弹性 <sup>*</sup>             | 部分屈服<br>抗剪不屈服   | 大部分屈服          |
| 变形要求           |                | —                           | —               | 控制弹塑性<br>层间位移角 |
| 整体计算方法         |                | 弹性反应谱                       | 弹性反应谱           | 弹塑性分析          |

| 剪力墙结构抗震性能目标 表 4 |              |                             |                 |                 |                |
|-----------------|--------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 结构构件            |              | 多遇地震<br>(水准1 <sup>*</sup> ) | 设防烈度地震<br>(水准3) | 罕遇地震<br>(水准4)   | 罕遇地震<br>(水准5)  |
| 关键构件            | 底部加强部位的重要剪力墙 | 弹性 <sup>*</sup>             | 不屈服<br>抗剪弹性     | 不屈服<br>抗剪弹性     | 个别屈服<br>抗剪不屈服  |
| 普通竖向构件          | 除关键构件外的剪力墙   | 弹性 <sup>*</sup>             | 不屈服<br>抗剪弹性     | 部分屈服<br>抗剪不屈服   | 较多屈服<br>满足截面抗剪 |
| 耗能构件            | 连梁           | 弹性 <sup>*</sup>             | 部分屈服<br>抗剪不屈服   | 大部分屈服<br>满足截面抗剪 | 普遍屈服<br>满足截面抗剪 |
| 变形要求            |              | —                           | —               | 控制弹塑性<br>层间位移角  | 控制弹塑性<br>层间位移角 |
| 整体计算方法          |              | 弹性反应谱                       | 弹性反应谱           | 弹塑性分析           | 弹塑性分析          |

框架-剪力墙结构抗震性能目标 表 5

| 结构构件       |                  | 多遇地震<br>(水准 1 <sup>*</sup> ) | 设防烈度地<br>震(水准 3) | 罕遇地震<br>(水准 4)  | 罕遇地震<br>(水准 5) |
|------------|------------------|------------------------------|------------------|-----------------|----------------|
| 关键<br>构件   | 底层加强部位<br>的重要剪力墙 | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 不屈服<br>抗剪弹性     | 个别屈服<br>抗剪不屈服  |
| 普通竖<br>向构件 | 除关键构件外<br>的剪力墙与柱 | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 部分屈服<br>抗剪不屈服   | 较多屈服满<br>足截面条件 |
| 耗能<br>构件   | 梁                | 弹性 <sup>*</sup>              | 部分屈服<br>抗剪不屈服    | 大部分屈服<br>满足截面抗剪 | 普遍屈服满<br>足截面抗剪 |
|            | 连梁               | 弹性 <sup>*</sup>              | 部分屈服<br>抗剪不屈服    | 大部分屈服<br>满足截面抗剪 | 普遍屈服满<br>足截面抗剪 |
| 变形要求       |                  | —                            | —                | 控制弹塑性<br>层间位移角  | 控制弹塑性<br>层间位移角 |
| 整体计算方法     |                  | 弹性反应谱                        | 弹性反应谱            | 弹塑性分析           | 弹塑性分析          |

框架-筒体结构抗震性能目标 表 6

| 结构构件       |                          | 多遇地震<br>(水准 1 <sup>*</sup> ) | 设防烈度地<br>震(水准 3) | 罕遇地震<br>(水准 4) | 罕遇地震<br>(水准 5) |
|------------|--------------------------|------------------------------|------------------|----------------|----------------|
| 关键<br>构件   | 加强层伸臂                    | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 不屈服<br>抗剪弹性    | 个别屈服<br>抗剪不屈服  |
|            | 支承伸臂作用的周边环<br>带结构及竖向支承构件 | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 不屈服<br>抗剪弹性    | 个别屈服<br>抗剪不屈服  |
|            | 承托上部多个楼层框架<br>柱的腰行架      | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 不屈服<br>抗剪弹性    | 个别屈服<br>抗剪不屈服  |
|            | 底部加强部位的重要剪<br>力墙         | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 不屈服            | 个别屈服<br>抗剪不屈服  |
| 普通竖<br>向构件 | 筒体剪力墙                    | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 部分屈服满<br>足截面抗剪 | 较多屈服满<br>足截面抗剪 |
|            | 框架柱                      | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 部分屈服<br>抗剪不屈服  | 较多屈服满<br>足截面抗剪 |
| 耗能<br>构件   | 框架梁                      | 弹性 <sup>*</sup>              | 部分屈服<br>抗剪不屈服    | 较多屈服满<br>足截面抗剪 | 普遍屈服<br>满足截面抗剪 |
|            | 连梁                       | 弹性 <sup>*</sup>              | 部分屈服<br>抗剪不屈服    | 较多屈服满<br>足截面抗剪 | 普遍屈服<br>满足截面抗剪 |
| 变形要求       |                          |                              |                  | 控制弹塑性<br>层间位移角 | 控制弹塑性<br>层间位移角 |
| 整体计算方法     |                          | 弹性反应谱                        | 弹性反应谱            | 弹塑性分析          | 弹塑性分析          |

框支剪力墙结构抗震性能目标 表 7

| 结构构件       |                      | 多遇地震<br>(水准 1 <sup>*</sup> ) | 设防烈度地<br>震(水准 3) | 罕遇地震<br>(水准 4)  | 罕遇地震<br>(水准 5) |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------|-----------------|----------------|
| 关键<br>构件   | 框支柱                  | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 不屈服<br>抗剪弹性     | 个别屈服<br>抗剪不屈服  |
|            | 转换梁                  | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 不屈服<br>抗剪弹性     | 个别屈服<br>抗剪不屈服  |
|            | 转换层以下落地剪力墙           | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 不屈服<br>抗剪弹性     | 个别屈服<br>抗剪不屈服  |
|            | 转换层以上加强层部位<br>的重要剪力墙 | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 不屈服<br>抗剪弹性     | 个别屈服<br>抗剪不屈服  |
| 普通竖<br>向构件 | 除关键构件外的剪力墙           | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 部分屈服<br>抗剪不屈服   | 较多屈服满<br>足截面抗剪 |
| 耗能<br>构件   | 连梁                   | 弹性 <sup>*</sup>              | 部分屈服<br>抗剪不屈服    | 大部分屈服满<br>足截面抗剪 | 普遍屈服满<br>足截面抗剪 |
| 转换层处楼板     |                      | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 个别屈服<br>抗剪不屈服   | 不屈服满足<br>截面抗剪  |
| 变形要求       |                      | —                            | —                | 控制弹塑性<br>层间位移角  | 控制弹塑性<br>层间位移角 |
| 整体计算方法     |                      | 弹性反应谱                        | 弹性反应谱            | 弹塑性分析           | 弹塑性分析          |

另外,结构中如有下列构件:大跨连体结构的连接体及与其相连的竖向支承构件、大悬挑结构的主要悬挑构件、扭转变形很大部位的竖向(斜向)构件、重要的斜撑构件、错层柱墙等,视其实际受力状况确定是否定义为结构中的关键构件。

### 3.4 楼盖抗震性能目标

地震作用下,结构楼盖系统主要起着协调周围各连接竖向构件抗侧力的作用。一般建筑平面规则且楼板面无大的缺失、开孔或凹凸变化的情况,在地震作用下楼板面内仅产生较小的应力,此时的楼板可定义为普通构件,其抗震性能目标可相应定得较低,但有时楼板在地震作用下起着关键构件的作用,如常见的弱连接楼盖,此时如果楼盖严重破坏将导致与其相连接的竖向构件丧失承载能力,因此合理确定其抗震性能目标十分重要,表 8 为建议的楼盖抗震性能目标。

楼盖抗震性能水准 表 8

| 结构楼盖  | 多遇地震<br>(水准 1 <sup>*</sup> ) | 设防烈度地<br>震(水准 3) | 罕遇地震<br>(水准 4) | 罕遇地震<br>(水准 5) |
|-------|------------------------------|------------------|----------------|----------------|
| 一般楼盖  | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服<br>抗剪弹性      | 部分屈服<br>抗剪不屈服  | 较多屈服满<br>足截面抗剪 |
| 弱连接楼盖 | 弹性 <sup>*</sup>              | 弹性               | 抗剪弹性           | 不屈服            |
| 板端抗弯  | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服              | 允许屈服           | 允许屈服           |
| 楼盖梁   | 弹性 <sup>*</sup>              | 不屈服              | 允许屈服           | 允许屈服           |

### 3.5 个别关键构件的性能设计

应根据结构特点对个别关键构件或部位单独进行性能设计。

### 3.6 抗震构造措施

可按第 2 节的要求对不同性能目标不同抗震设防烈度区的建筑采取适当的抗震构造措施。

### 3.7 构件在不同状态下的验算

构件在不同状态下可按下列公式进行验算,本节中符号含义同高规。

(1) 构件处于弹性<sup>\*</sup>状态时,应满足弹性设计要求,其承载力和变形应符合高规有关规定。

(2) 构件处于弹性状态时,结构构件的抗震承载力应符合下式规定:

$$\gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk}^* + \gamma_{Ev} S_{Evk}^* \leq R_d / \gamma_{RE}$$

(3) 构件处于不屈服状态时,其截面承载力应符合下式规定:

$$S_{GE} + S_{Ehk}^* + 0.4 S_{Evk}^* \leq R_k$$

水平长悬臂结构和大跨度结构中的构件截面承载力应符合:

$$S_{GE} + 0.4S_{Ehk}^* + S_{Evk}^* \leq R_k$$

(4) 构件满足截面抗剪条件,应符合下列规定:  
钢筋混凝土竖向构件的受剪截面:

$$V_{GE} + V_{Ek}^* \leq 0.15f_{ck}bh_0$$

钢筋混凝土组合剪力墙的受剪截面:

$$(V_{GE} + V_{Ek}^*) - (0.25f_{ak}A_a + 0.5f_{spk}A_{sp}) \leq 0.15f_{ck}bh_0$$

(5) 剪力墙截面抗剪验算

偏心受压时剪力墙截面验算按下式:

$$V \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[ \frac{1}{(\lambda - 0.5)} \left( 0.4f_t b_w h_{w0} - \frac{0.1NA_w}{A} \right) + 0.8f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} \right]$$

偏心受拉时剪力墙截面验算按下式:

$$V \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[ \frac{1}{(\lambda - 0.5)} \left( 0.4f_t b_w h_{w0} + \frac{0.1NA_w}{A} \right) + 0.8f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} \right]$$

上式右端方括号内的计算值小于  $0.8f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0}$

时,应取  $0.8f_{yh} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0}$ 。

剪力墙拉裂截面的抗剪验算:

$$V_{wj} \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.6f_y A_s + 0.8N)$$

#### 4 结语

对结构抗震设计方法的研究历经近百年的历史,先后经历过3个阶段,目前已进入较完善的抗震

性能设计阶段,即第三代抗震设计方法。其主要内涵为抗震设计应充分考虑地震作用的随机性,分别采用不同量化方法,按小震、中震、大震作用进行抗震分析,采取必要的抗震构造措施,做到小震不坏,中震不需修理或稍加修理(A、B级)、一般修理(C、D\*级)或修复加固后可继续使用(D级),大震稍加修理或一般修理(A、B级)、修复加固后可继续使用(C级)、不倒塌(D、D\*级),还可根据构件位置、受力特性及在抗震中的不同重要性,采用不同的性能目标。第三代抗震设计方法是一个较为优越的抗震设计方法,今后随着不断的实践和研究,必将出现一些新的改进和补充。

#### 参 考 文 献

- [1] TJ 11—74 工业与民用建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1974.
- [2] TJ 11—78 工业与民用建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1978.
- [3] 魏琰, 韦承基. 试论建筑结构抗震设计的基本原则[J]. 建筑结构学报, 1984, 5(6): 49-56.
- [4] GBJ 11—89 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [5] 魏琰, 王森. 建筑抗震设计的屈服判别法及其工程应用[J]. 建筑结构, 2006, 36(S1): 13-17.
- [6] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [7] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

(上接第73页)

点,单调荷载作用下的极限位移  $\delta_t$  与低周反复荷载作用下的最大位移之间的关系有待进一步研究。

(3) 模型一对钢筋混凝土柱-钢梁节点的适用性、模型二的滞回耗能因子  $\beta$  的准确确定等问题,有待进一步研究。

#### 参 考 文 献

- [1] 何利, 叶献国. Kratzig 及 Park-Ang 损伤指数模型比较研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(12): 1-6.
- [2] 应义森, 杨俊杰, 陈雄, 等. 余震作用下早龄期混凝土柱裂缝及内部损伤分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(3): 72-74.
- [3] 胡义, 郑山锁, 陶清林. SRC 柱主要设计参数的损伤敏感度分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(6): 72-76.
- [4] 郭子雄, 刘阳, 杨勇, 等. 结构震害指数研究评述[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(5): 56-61.
- [5] 蔡秋琦, 高磊, 王君杰. 结构损伤指标研究综述[J]. 结构工程师, 2010, 26(4): 144-153.
- [6] PARK Y J, ANG H S. Seismic damage analysis of

reinforced concrete buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.

- [7] KUNNATH S K, REINHORN A M, PARK Y J. Analytical modeling of inelastic seismic response of R/C structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(4): 996-1017.
- [8] BANON H, BIGGS J M, IRVINE H M. Seismic damage in reinforced concrete frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1981, 107(9): 1713-1729.
- [9] ROUFAIEL M S L, MEYER C. Analytical modeling of hysteretic behavior of R/C frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(3): 429-444.
- [10] 刘良林, 王全凤, 林煌斌. 地震损伤评价的累积滞回耗能计算[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2011, 32(5): 565-568.
- [11] 欧进萍, 何政, 吴斌, 等. 钢筋混凝土结构的地震损伤控制设计[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 63-70.
- [12] 傅剑平, 王敏, 白绍良. 对用于钢筋混凝土结构的 Park-Ang 双参数破坏准则的识别和修正[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(5): 73-79.