

文章编号: 1000-4750(2014)06-0001-12

# 建筑结构基于能量抗震设计方法研究

叶列平<sup>1</sup>, 缪志伟<sup>2</sup>, 程光煜<sup>1</sup>, 马千里<sup>1</sup>, 陆新征<sup>1</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘 要:** 该文系统总结了建筑结构基于能量抗震设计方法的相关研究成果, 指出结构损伤耗能机制控制是确定结构累积耗能分布和实现基于能量抗震设计的关键。分别针对钢支撑框架结构、RC 框架结构和 RC 框-剪结构的合理耗能机制控制进行了研究。在此基础上, 建立了基于能量抗震设计方法的实施框架, 并分别针对钢支撑框架结构、RC 框架结构和 RC 框-剪结构给出了具体的基于能量抗震设计方法。

**关键词:** 基于能量抗震设计; 耗能机制控制; 耗能分布; 钢支撑框架结构; RC 框架结构; RC 框-剪结构

中图分类号: TU375 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.0388

## STUDY ON THE ENERGY-BASED SEISMIC DESIGN METHOD OF BUILDING STRUCTURES

YE Lie-ping<sup>1</sup>, MIAO Zhi-wei<sup>2</sup>, CHENG Guang-yu<sup>1</sup>, MA Qian-li<sup>1</sup>, LU Xin-zheng<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of China Education Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Recent research progress on the energy-based seismic design method for building structures is comprehensively reviewed. It is pointed out that the control of structural energy dissipation mechanism is the key to determine the dissipated energy distribution in structures and realize an energy-based seismic design. Reasonable energy dissipation mechanisms are studied and corresponding control methods are developed for steel braced frames, reinforced concrete frame structures and reinforced concrete frame-shear-wall structures, respectively. A framework for energy-based seismic design is proposed based on the control of energy dissipation mechanism, and the application of the proposed method is demonstrated for the three types of structures.

**Key words:** energy-based seismic design; energy dissipation mechanism control; dissipated energy distribution; steel braced frame structure; reinforced concrete frame structure; reinforced concrete frame-shear-wall structure

结构抗震设计是一个确定结构及构件的抗震能力需求, 并采取相应抗震措施的过程。地震地面运动有三个特性, 即地面运动强度、频谱和持时, 目前工程中主要采用基于承载力和基于位移的方法来确定结构构件的承载力需求及其相应位移需求(变形能力需求), 但未考虑地震持时对结构造成

的累积损伤效应, 不能全面反映结构的抗震机理。20 世纪 50 年代, Housner<sup>[1]</sup>首先提出了基于能量的结构抗震设计思想, 即将结构在地震中的响应视为一个能量输入并由结构阻尼和累积滞回能量耗散的过程, 只要在整个地震持时过程中结构的阻尼耗能和滞回耗能的能力大于地震输入能量, 结构即可

收稿日期: 2013-05-06; 修改日期: 2013-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51222804, 51261120377, 51008078); 霍英东教育基金项目(131071)

通讯作者: 叶列平(1960), 男, 浙江人, 教授, 工学博士, 博导, 从事混凝土结构与结构抗震研究(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 缪志伟(1981), 男, 江苏人, 副教授, 工学博士, 从事结构抗震减震设计研究(E-mail: zhiweiseu@sina.com);

程光煜(1980), 男, 陕西人, 工学博士, 从事结构抗震设计研究(E-mail: chengguangyu98@mails.tsinghua.edu.cn);

马千里(1983), 男, 江苏人, 工学博士, 从事结构抗震设计研究(E-mail: maqianli00@mails.tsinghua.edu.cn);

陆新征(1978), 男, 安徽人, 教授, 工学博士, 博导, 从事结构数值模拟与防灾减灾研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn).

有效抵抗地震作用而不倒塌。由于地震持时过程中结构的累积滞回耗能指标反映了地震引起的结构累积损伤效应,故基于能量的抗震设计思想能更全面地反映结构抗震的本质。

本文对基于能量抗震设计方法的相关研究成果进行了简要介绍,归纳总结了已有的基于能量抗震设计流程,并分析讨论了现有基于能量设计方法所存在的问题,指出控制结构的损伤耗能机制是具体实现基于能量抗震设计的关键,并基于这一思路分别针对钢支撑框架结构、钢筋混凝土框架结构(RC 框架结构)和钢筋混凝土框架-剪力墙结构(RC 框-剪结构),介绍了基于能量的结构抗震设计方法。

## 1 基于能量抗震设计方法的研究现状

基于能量抗震设计方法除需定量确定结构中各个构件的承载力需求和变形能力需求外,还需确定各个构件的累积耗能需求,进而对构件进行耗能损伤评价和能力设计。传统的结构抗震设计方法已给出了结构构件承载力需求和变形能力需求的计算方法,因而结构的总累积耗能需求  $E_H$  的分析及其在结构构件中的分布和损伤评价是基于能量抗震设计需解决的关键问题。

### 1.1 结构总累积耗能需求 $E_H$ 的计算

自 Housner 开始,许多学者先后研究了单自由度(SDOF)系统和多自由度(MDOF)系统的总累积滞回耗能需求  $E_H$ <sup>[2-10]</sup>。目前,关于结构的地震总输入能  $E_I$ 、总累积滞回耗能  $E_H$  在  $E_I$  中所占比例  $E_H/E_I$  的研究已基本成熟,获得了可用于设计的弹塑性 SDOF 系统的  $E_I$  谱和  $E_H/E_I$  谱<sup>[3-9]</sup>。对于实际结构的弹塑性 MDOF 系统,为了能够应用 SDOF 系统的能量研究成果,研究者们采取以“单”代“多”的思路,着重研究了 MDOF 系统与 SDOF 系统地震输入能量的相关关系。结果表明,对于高度较小的结构,可由对应于结构一阶周期的等效 SDOF 系统确定结构的地震总输入能量  $E_{I,MDOF}$  和总累积滞回耗能  $E_H$  的需求<sup>[2,6,10]</sup>,计算流程见图 1。对于高阶振型影响较大的多高层规则结构,文献[11]基于 Chopra 等<sup>[12]</sup>提出的 MPA 方法,研究了基于 MPA 方法确定结构各阶周期等效弹塑性 SDOF 系统的能量与实际弹塑性 MDOF 系统的能量之间的关系,研究结果表明,可采用多阶振型组合方法确定多高层结构的总累积滞回耗能  $E_H$ ,即只需通过结构各阶周期的等效 SDOF 系统的总累积滞回耗能叠加即可。文献[10]通

过算例分析验证了该方法的有效性。基于 Chopra 提出的可考虑平面不对称结构的修正 MPA 方法<sup>[13]</sup>,文献[14]进一步将基于多阶振型组合的结构总耗能计算方法拓展到平面不对称高层结构。

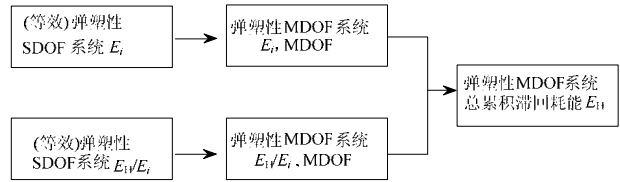


图 1 结构总累积滞回耗能需求  $E_H$  的计算流程

Fig.1 Procedure for calculating structural member total cumulative dissipated energy

### 1.2 总累积耗能 $E_H$ 在结构中的分布

获得结构的总累积耗能  $E_H$  后,需进一步确定结构中各个构件的累积耗能需求  $E_{Hi}$ ,才能最终将基于能量抗震设计落实到构件层次。目前关于  $E_H$  分布的研究成果主要是针对各种不同结构形式的大量弹塑性分析获得。Akbas 和 Shen 等<sup>[15-16]</sup>根据 1 层、3 层、6 层、10 层、15 层、20 层规则钢框架结构的计算结果进行回归,认为阻尼比为 0.02 时的  $E_H$  呈上小下大的线性分布。肖明葵<sup>[17]</sup>分析了剪切型和弯剪型多层结构的  $E_H$  分布规律,统计了耗能集中层占结构总累积滞回耗能的比。史庆轩等<sup>[18]</sup>研究了地面运动参数和结构参数对 RC 框架结构  $E_H$  层间分布的影响,定性地对 RC 框架结构的累积滞回耗能层间分布规律进行了总结,认为累积滞回耗能在结构层间的分布基本上呈下大上小的梯形分布。刘哲峰等<sup>[19]</sup>针对高层钢框架-剪力墙混合结构的分析研究表明,  $E_H$  主要集中在剪力墙底部区域,而钢框架部分则基本不参与滞回耗能,并通过参数分析研究得到了底层剪力墙的耗能比例与结构周期及强震持时的关系。文献[20]通过对不同高度钢框架的弹塑性时程分析表明,对于普通设计的高层钢框架,强震作用下的耗能需求在结构顶部和底部楼层较大。文献[21-22]同样针对一系列的规则钢框架结构,通过时程分析研究得到,当钢框架严格按照“强柱弱梁”进行设计时,各楼层框架梁所耗散的能量沿楼层呈对数正态分布,并通过统计回归给出了各楼层的  $E_H$  分布。

此外,部分学者借助静力弹塑性分析确定  $E_H$  的分布。1996 年 Fajfar 等<sup>[23]</sup>提出采用推覆分析方法确定 RC 框架和框架-剪力墙结构的  $E_H$  分布。Chou 等<sup>[24]</sup>基于 MPA 方法给出了钢框架结构相应于小震、中震和大震 3 个状态时  $E_H$  的分布,并通过多阶振

型推覆组合法考虑了结构高阶振型对  $E_H$  分布的影响,给出了  $E_H$  的近似分布。朱建华和沈蒲生<sup>[25]</sup>采用幂级数水平加载模式的推覆分析计算了 RC 框架结构和 RC 框架-核心筒结构的  $E_H$  分布。文献<sup>[26]</sup>提出的基于能量 RC 框架结构抗震性能评估方法,也采用了与 Chou 所提出的类似方法来计算结构各楼层的  $E_H$  分布。虽然通过推覆方法确定  $E_H$  分布可简化分析计算,但该方法只是通过结构弹塑性变形的峰值量分布来近似确定结构的  $E_H$  分布,而  $E_H$  是结构在往复地面运动下的动态累积量,对于一般的结构,这两者之间并不一定存在线性对应关系,故该方法确定  $E_H$  分布的结果准确性无法保证。

事实上,由于结构参数分布的复杂性和地面运动的不确定性,使得总累积耗能  $E_H$  在结构中的分布具有随机性和不均匀性。Akiyama<sup>[21]</sup>早在 1985 年就指出,对于层模型,由于高阶模态和地震动的不确定性,多自由度系统的能量分布不均匀,会出现耗能集中楼层位置具有不确定性的问题。程光煜等<sup>[27]</sup>采用层模型研究也同样得到 MDOF 系统中可能会出现能量集中层位置不确定的问题。Gupta 等<sup>[28]</sup>采用杆系模型分析也得到类似的结论。

由于结构总累积耗能  $E_H$  分布的复杂性,使得设计者无法确定结构中各构件的累积耗能需求,这成为长期制约基于能量抗震设计方法进一步发展的原因,也是基于能量抗震设计方法研究中的难点。

### 1.3 耗能损伤评价和能力设计

为将基于能量抗震设计落实到构件层次,在确定结构各构件的累积耗能需求后,须对各构件进行耗能损伤设计,以按预期损伤控制目标进行构件损伤控制设计。目前,这方面的研究主要以试验为基础,通过构件耗能损伤试验研究的统计结果确定构件累积滞回耗能与损伤程度的关系,建立相应的构件损伤评估模型。大量试验研究表明,结构构件在地震作用下的损伤破坏与其往复受力历程的累积滞回耗能和最大塑性变形相关。对于钢筋混凝土构件,研究者们提出了各种结构和构件损伤评价模型<sup>[29-34]</sup>,其中以式(1)基于最大塑性变形和累积滞回耗能的 Park-Ang 模型<sup>[29]</sup>被广泛认可。Fajfar 和 Teran-Gilmore 等<sup>[35-36]</sup>应用 Park-Ang 模型及其改进模型建立了可用于钢筋混凝土结构的损伤评价方法。

$$D_{PA} = \frac{\theta_{\max}}{\theta_u} + \beta \frac{E_{H0}}{M_y \theta_u} \quad (1)$$

式中: $D_{PA}$  为构件损伤指标; $\theta_{\max}$ 、 $E_{H0}$  分别为地震作用下构件塑性铰的最大变形需求(最大位移角)和累积耗能需求; $\theta_u$  为构件在单调加载工况下的极限位移角(极限变形能力); $M_y$  为构件的屈服承载力; $\beta$  为由构件的体积配箍率、剪跨比和轴压比等参数综合确定的经验系数。

对于钢结构的损伤评价,目前有两种思路:第一种与混凝土构件研究相同,采用双参数准则<sup>[37]</sup>;另一种则是仅考虑累积滞回耗能造成的累积损伤,通过对构件进行低周疲劳验算进行耗能损伤设计<sup>[38-40]</sup>。

### 1.4 基于能量抗震设计的流程

基于上述研究成果,部分学者提出了基于能量抗震设计流程。1985 年,日本学者 Akiyama<sup>[21]</sup>在其专著中基于对 SDOF 系统和 MDOF 系统的能量分析研究,提出了基于能量抗震设计的思路和方法,但其工作多数停留在理论层面,无法实际应用。1996 年 Fajfar 等<sup>[23]</sup>在之前研究工作的基础上,应用 N2 方法和修正的 Park-Ang 模型,进行了钢筋混凝土结构的设计和损伤评估,具体流程见图 2(a)。该设计流程将基于能量抗震设计与基于位移抗震设计的性能评估方法相结合,对基于能量抗震设计向实用化发展具有重要意义。但是,由于该设计流程在确定总累积耗能  $E_H$  的分布时采用 Pushover 方法,正如 1.2 节所述,对于一般结构,该方法的准确性无法保证,需要探讨其适用条件。

针对钢框架结构,Shen 基于弹塑性时程分析的小样本量回归统计,得到 MDOF 系统的  $E_I$  和  $E_H$  的需求,并基于  $E_H$  沿高度线性分布的假定,提出了基于能量抗震设计的流程,如图 2(b)所示<sup>[15-16]</sup>。但程光煜等<sup>[27]</sup>的研究认为,对于一般小阻尼比结构,难以保证  $E_H$  沿结构高度线性分布,只有高阻尼比结构( $\xi > 0.1$ ), $E_H$  沿结构高度才可近似为线性分布。因此,该流程中关于  $E_H$  线性分布的假定与实际情况有较大偏差。

Chou 等<sup>[24]</sup>针对钢框架结构也提出了基于能量抗震设计方法的流程如图 2(c)所示。该流程在总体思路上分别借鉴了 Fajfar 和 Shen 提出的流程,最主要的改进是通过采用 MPA 方法来计算结构总累积耗能  $E_H$  的分布。由于考虑了高阶振型的影响,因此可应用于高层结构。但 MPA 方法本质上仍属 Pushover 方

法,如前所述,对于未采取特定结构损伤机制控制措施的一般结构,在计算 $E_H$ 分布时将导致较大偏差。

文献[41]基于能量平衡的概念提出了一种针对框架结构的塑性设计方法。该方法明确了必须以控制框架结构在地震作用下实现“强柱弱梁”的整体屈服机制为前提。在此基础上,根据结构在地震作用下的预设目标位移,假定地震过程中结构的塑性耗能结构与结构单向推覆(按结构第一振型设置侧向力模式)加载至目标位移时所耗散的能量相等,得到结构的设计基底剪力。之后再对结构进行静力分析,按照能力设计法的要求进行“强柱弱梁”承载力设计。文献[42]基于上述方法,在考虑钢筋混凝土结构的滞回特性基础上适当修正了能量谱的计算方法后,应用于RC框架结构的设计。这一方法虽然应用了“能量平衡”的概念,但其假定与实际情况不符,因为结构在地震作用下的塑性耗散是累积量,与结构单向加载至最大位移时的塑性耗散能量是不相等的。从本质上来看,该方法仍属直接基于位移的抗震设计方法,是基于一种特定的 $R-\mu-T$ 关系的设计方法。

除上述基于能量的结构抗震设计方法外,还有一些学者研究了消能减震结构的基于能量设计方法。文献[43-44]针对BRB支撑钢框架结构提出了一种基于能量设计流程。在该结构体系中,框架柱底和梁柱结点均为铰接,因此主体框架仅承受重力荷载,而由BRB支撑抵抗全部水平地震作用。该设计流程是在主体框架按相关规范设计完成的前提下,基于所有累积耗能全部由BRB支撑系统耗散的假定,定量设计BRB支撑系统,是一种消能减震结构基于能量的设计方法。具体设计时,根据结构的一阶周期和预设目标延性,由累积滞回耗能谱和累积延性系数谱确定结构的总累积耗能 $E_H$ 和支撑系统的总累积变形;然后基于 $E_H$ 沿楼层高度的线性分布假定计算各楼层的 $E_H$ 耗能需求,并结合支撑系统的总累积变形确定各层的BRB支撑的截面参数。显然,该方法是用对应结构一阶周期的等效单自由度系统的地震响应来替代实际结构的响应,故只适用于高度较小的中低层结构。文献[45]也提出了一种采用耗能支撑阻尼器加固框架结构的基于能量设计方法。该方法的总体思路也是使结构的累积滞回耗能全部由各楼层的阻尼器耗散。在确定各楼层的累积耗能分布时采用了均匀分布假定。与文献[43-44]的方法类似,该方法的适用范

围也仅限于高度较小的中低层结构。文献[46]采用等效粘滞阻尼概念,提出了消能减震结构的基于能量设计方法,可应用于不同类型阻尼器的减震结构。该方法的控制设计目标是使主体结构保持弹性,由各楼层的阻尼器耗散能量,据此定量设计各楼层阻尼器的布置方案。为了能应用于高阶振型影响较大的高层结构,该流程在确定各楼层的耗能需求分布时,与Chou的设计流程类似,采用了MPA方法。

### 1.5 以损伤耗能机制控制为前提的基于能量抗震设计方法

综上所述,基于能量抗震设计需首先确定结构中累积耗能 $E_H$ 的分布。对于各类抗震结构,由于目前的基于能量抗震设计方法未明确结构的损伤机制控制,因而无法控制结构中的耗能部位,这会导致结构中的耗能分布难以确定。而与消能减震结构相关的基于能量设计方法则实施效果更好,这是因为结构中附设消能器本身就是一种有效的结构控制设计措施,使得结构中的耗能部位明确,因而易于实现基于能量设计。

为使抗震结构在强震作用下具有稳定可控的耗能机制,一些研究者通过对结构采取“控制”措施来避免结构中耗能部位不确定的问题。文献[47]基于层模型分析讨论了结构屈服后刚度对结构地震响应的影响,指出要保证结构在强震下不出现耗能集中层,应设法使结构的屈服后刚度系数 $\gamma$ 不低于一定的数值。文献[48-50]尝试控制结构体系中不同构件的先后屈服次序来实现结构具有足够屈服后刚度的要求,相继提出了双重结构、损伤控制结构和刚柔结构的概念。文献[27]进一步提出了体系能力设计法,在结构设计之初就从结构体系层次上明确区分主结构和次结构。通过调整主、次结构的抗震承载力的能力比,使强震作用下主结构基本保持弹性以控制结构的整体变形模式和耗能机制,次结构构件承受损伤耗能。由于预先明确了损伤部位并采取了相应的控制措施,使得结构在弹塑性阶段由次结构或次要部位作为结构中耗散能量的主体,而整体结构的动力响应性能能有效地受控于主结构而不出现局部不确定的耗能集中层。

综上所述,通过对结构进行损伤耗能机制控制,使结构在强震作用下具有合理的耗能机制,是实现基于能量抗震设计的前提。文献[27]系统地论述了合理损伤耗能机制控制对于实现基于能量抗

震设计的意义。一方面,只有预先对结构进行合理的损伤耗能机制控制,才能避免由于地震动等不确定性因素引起的结构中耗能部位无规律现象,使结构具有稳定的预期耗能机制,进而使基于能量设计方法可以落实到构件层次。另一方面,经过合理损伤耗能机制设计的结构在强震作用下的耗能损伤部位明确,设计者可以有针对性地对耗能构件进行能力设计,保证结构有充分的耗能能力,从而有效地把握结构在强震作用下的弹塑性行为和整体结构的抗震性能。因此,合理损伤耗能机制控制是实现基于能量抗震设计方法的前提和基础,同时也是该方法相比于传统的基于承载力和基于位移抗震设计方法的优越性所在。

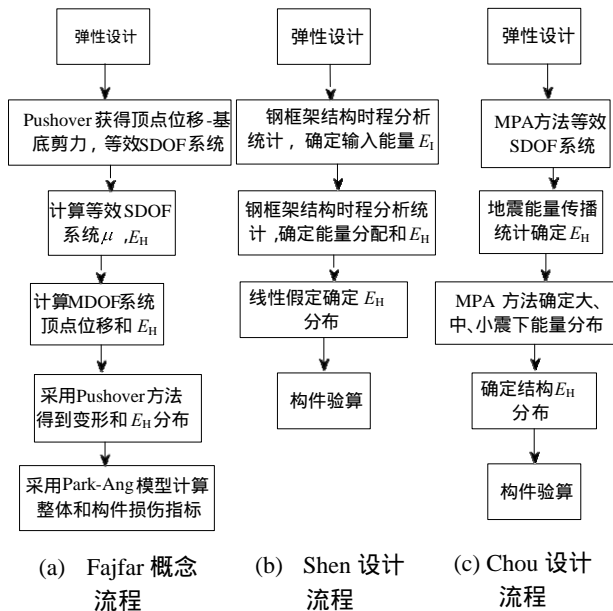


图 2 已有的基于能量抗震设计流程

Fig. 2 Existing energy-based seismic design procedures

在基于位移抗震设计的基础上,以结构合理耗能机制控制设计为前提,结合对预期耗能构件和部位的耗能损伤评价,图 3 给出了基于能量抗震设计方法的实施框架。基于该实施框架,可采用静力弹塑性分析方法来计算结构各构件的弹塑性变形需求(图 3 第 3 步)。由于不同类型结构的受力特点相差较大,其损伤耗能机制的控制目标和设计条件也各不相同,因此作为整个方法的最核心步骤,需要分别针对各类结构的受力特征进行结构损伤耗能机制控制研究(图 3 第 2 步)。以下分别针对钢支撑框架结构、RC 框架结构和 RC 框-剪结构,分别阐述其合理损伤耗能机制控制的设计条件和基于能量抗震设计方法的实施。

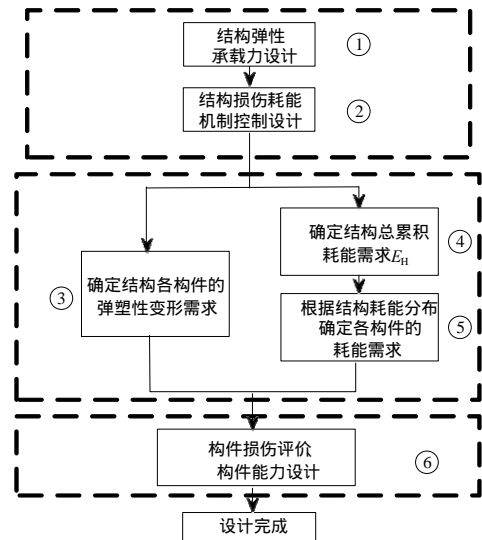


图 3 基于能量抗震设计方法实施框架

Fig. 3 Framework of proposed energy-based seismic design method

## 2 钢支撑框架结构基于能量抗震设计方法

### 2.1 钢支撑框架结构的损伤耗能机制控制

文献[27]通过体系能力设计法将图 4 所示的钢支撑框架结构设计成具有明确主、次结构的体系,使其在强震作用下具有合理的损伤耗能机制。具体来说,在钢支撑框架结构中,竖向荷载主要由框架承担,地震作用下框架梁、柱的性能直接决定了钢支撑框架结构的整体安全性,因此框架是整体结构中的主结构,且框架柱的重要性高于框架梁。支撑主要承担侧向力,发生屈服后不影响主结构的竖向承载能力,而且由于支撑的布置形式,在水平地震作用下支撑对层间侧移变形的敏感性比框架梁柱更大,故支撑将先于框架梁、柱屈服,因此支撑是结构中的主要耗能构件。鉴于普通支撑在强震作用下容易发生屈曲失稳,低周耗能能力较差,因此选用防屈曲支撑代替普通支撑作为次结构构件。

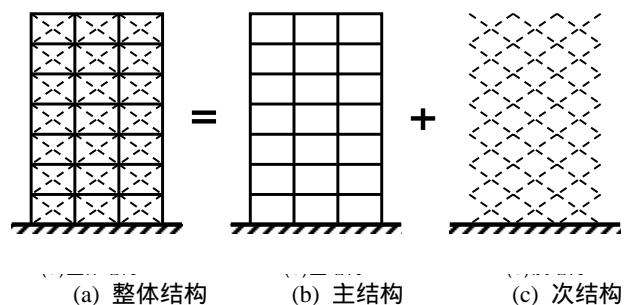


图 4 钢支撑框架结构及其主、次结构体系

Fig. 4 Braced steel frame and system hierarchy

结合结构的抗震设防目标，建议钢支撑框架结构的损伤耗能机制控制目标如下：

1) 小震作用下，主结构(框架梁柱)、次结构(支撑)均处于弹性范围；

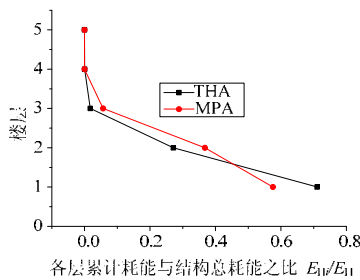
2) 中震作用下，次结构(防屈曲支撑)进入塑性，但塑性程度不大，震后无需修复；主结构中的框架柱保持弹性，大部分框架梁保持弹性，少量框架梁进入塑性且塑性发展程度较小。

3) 大震作用下，次结构(防屈曲支撑)屈服程度较大，但不超过其极限塑性变形能力；主结构中部分框架梁进入塑性，绝大部分框架柱保持弹性，少量框架柱屈服且塑性发展程度较小。

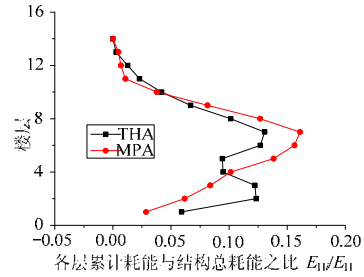
基于大量分析结果，文献[27]建议钢支撑框架结构的钢框架与支撑的抗侧刚度比不低于 0.5，可使整体结构形成主-次结构体系，且具有不低于 0.33 的屈服后刚度系数，从而可实现上述合理损伤耗能机制控制的目标。

### 2.2 钢支撑框架结构耗能分布计算

在对钢支撑框架结构进行合理损伤耗能机制控制设计的前提下，整体结构可避免在强震作用下出现不确定的局部耗能集中层，具有稳定的耗能分布。记第  $i$  层的总累积滞回耗能为  $E_{Hi}$ 。对于钢支撑框架结构  $E_{Hi}$  主要由该层的防屈曲支撑和框架梁端塑性铰分担。记第  $i$  层的防屈曲支撑和框架梁端塑性铰的耗能分别为  $E_{Hi,brace}$  和  $E_{Hi,beam}$ 。文献[27]通过大量的算例分析研究表明，如果对整体结构进行损伤耗能机制控制，则强震作用下结构各层最大变形反应分布与结构的累积滞回耗能分布有较好的对应关系。图 5、图 6 给出了在罕遇地震水准的 El Centro EW 地震输入下采用 MPA 方法确定的各层的累积耗能  $E_{Hi}$  分布和支撑与框架梁的累积耗能比  $E_{Hi,brace}/E_{Hi,beam}$ ，图中同时还给出了直接采用弹塑性时程分析(THA)的结果，可见两者结果接近。因此，对于经过损伤耗能机制控制设计的钢支撑框架结构，可采用 MPA 方法确定其累积滞回耗能分布。



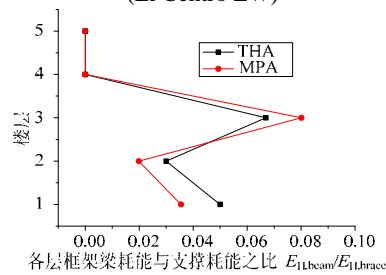
(a) 5 层结构



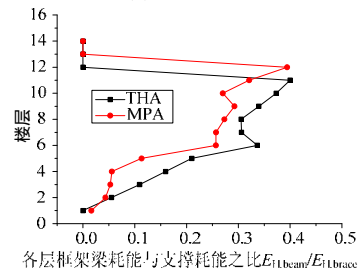
(b) 14 层结构

图 5 时程分析(THA)与 MPA 方法确定  $E_{Hi}/E_H$  的对比 (El Centro EW)

Fig.5 Comparison of  $E_{Hi}/E_H$  between THA and MPA under (El Centro EW)



(a) 5 层结构



(b) 14 层结构

图 6 时程分析(THA)与 MPA 方法确定各层构件分配的对比(El Centro EW)

Fig.6 Comparison of  $E_H$  for story beam and brace between THA and MPA under (El Centro EW)

### 2.3 钢支撑框架结构构件耗能损伤评价和设计

在确定各楼层支撑和框架梁端塑性铰的耗能后，可根据相关的规范要求<sup>[40]</sup>或者结合相关试验研究，对耗能构件和耗能部位进行低周疲劳设计验算，进行构件层次的基于能量抗震设计。关于钢支撑框架的具体设计算例可参见文献[27]。

## 3 RC 框架结构基于能量抗震设计方法

### 3.1 RC 框架结构损伤耗能机制控制

由框架梁和框架柱共同组成的框架结构属于单一结构体系。结构竖向荷载由框架柱承担，显然框架柱在结构中的重要性高于框架梁。强震作用下 RC 框架结构的损伤耗能机制主要有图 7 所示的几种。图 7(a)的“强柱弱梁”机制，框架柱仅在底层柱底屈服，结构主要由各层框架梁端塑性铰耗散地

震能量，是一种整体型屈服耗能机制。若柱铰出现在某一层或几层，形成软弱层机制(图 7(b))或部分软弱层破坏(图 7(c))，都属于局部屈服耗能机制，容易引起结构中的塑性变形和累积滞回耗能集中，易导致结构发生局部楼层倒塌。而且，在局部屈服耗能机制下，因地震动的随机性会导致的结构弹塑性响应的离散性显著增大，结构的耗能分布没有相对稳定的规律<sup>[51]</sup>。

由此可见，对于普通 RC 框架结构，要使其在强震作用下具有相对稳定的  $E_H$  分布，关键在于控制其实现“强柱弱梁”机制。文献[52]针对我国汶川地震中框架结构大多未能实现“强柱弱梁”机制的问题，结合国外几个代表性规范的相关规定和文献资料，并根据大量 RC 框架结构的弹塑性时程算例分析，提出在考虑楼板有效翼缘宽度、并根据实配钢筋面积(计入受压筋)和材料强度标准值确定框架梁实际受弯承载力的前提下，控制 RC 框架结构柱梁抗弯承载力比  $\eta$  不小于 1.4 可基本保证 RC 框架结构形成“强柱弱梁”机制。

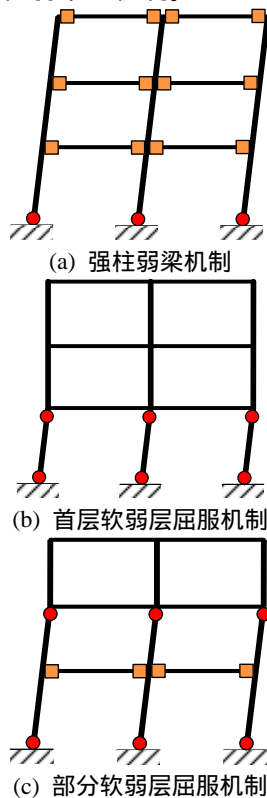


图 7 RC 框架结构损伤耗能机制

Fig. 7 Energy dissipation mechanism of RC frame structure

### 3.2 RC 框架结构的耗能分布计算

在对 RC 框架结构进行“强柱弱梁”机制控制设计的前提下，文献[51]研究了总累积滞回耗能  $E_H$  在框架梁和框架柱中的分配规律。研究表明，所有

框架梁的总累积滞回耗能  $E_{BH}$  与  $E_H$  之比  $E_{BH}/E_H$  可达 90% 以上，即总累积耗能基本由框架梁分担，而框架柱的总累积滞回耗能  $E_{CH}$  则较小，并且只在底层柱底耗能，框架柱的损伤位置和程度均可得到有效控制。同时，研究结果还显示，满足“强柱弱梁”机制控制的框架结构，框架梁的耗能沿楼层高度的分布具有稳定的模式，大致可以分为三段：即结构中下部的线性增长段、中上部的平台段和结构顶层单独作为一段。据此，文献[51]提出了 RC 框架梁耗能沿楼层高度分布的简化计算公式。此外，为了计算每层各个框架梁的累积耗能分布，文献[51]通过算例分析表明可采用 MPA 方法近似确定。在此基础上，可按照图 8 所示流程确定 RC 框架结构中各梁柱构件的累积耗能需求。

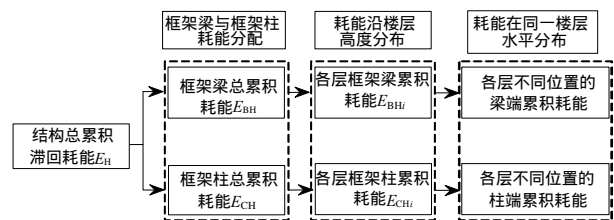


图 8 RC 框架结构的耗能分布计算流程

Fig. 8 Procedure for calculating cumulative dissipated energy distribution in RC frame structures

### 3.3 RC 框架结构构件耗能损伤评价和设计

在确定了 RC 框架结构的所有框架梁和底层框架柱的累积滞回耗能后，可以结合构件的最大塑性变形需求，采用 Park-Ang 模型进行梁柱构件耗能损伤评价和能力设计。文献[53]分别针对不同类型的 RC 构件，全面地总结了 RC 梁柱构件极限变形能力  $\theta_u$  的相关研究成果，提出了  $\theta_u$  与构件配箍量的相关关系。综合这些成果，可将 RC 构件的耗能损伤评价和设计落实到构件的极限变形能力  $\theta_u$  上。具体来说，首先根据构件损伤设计目标值  $D_{PA}$  ( $D_{PA}$  可根据安全度要求取不大于 1 的数值)，由式(1)确定 RC 框架梁、柱构件的极限变形能力  $\theta_u$  的设计值；然后根据  $\theta_u$  与构件配箍量的相关关系，确定各构件所需配置的箍筋量，确保其具备足够的极限变形和耗能能力，实现构件层次的基于能量抗震设计。

采用上述基于能量抗震设计方法对一 4 层规则 RC 框架结构的 y 向进行设计。结构平面如图 9，层高均为 3.6m。8 度抗震设防，地震分组为第一组，二类场地。其它信息详见文献[51]。在进行结构布置后，根据我国现行抗震规范(GB50011-2010)进行结构承载力设计，得到各层框架梁和底层框架柱底

端的纵筋配筋量。然后根据损伤耗能机制的设计要求，按照框架柱梁抗弯承载力比 $\eta=1.4$ 对各梁柱节点处的柱端进行配筋设计。之后，采用一阶 MPA 方法进行各构件的弹塑性变形需求分析，同时在确定结构总累积耗能 $E_H$ 后，按照 3.2 节所述流程计算各构件的累积耗能需求 $E_{Hi}$ ，最后基于 Park-Ang 模型进行构件耗能损伤评价和设计，确定构件的配箍值。完成设计后，选取 10 条强震记录<sup>[51]</sup>对该 RC 框架进行弹塑性时程分析。图 10 给出了框架梁累积滞回耗能 $E_{BH}$ 沿楼层高度分布的时程计算结果和本文建议方法的计算结果，可以看出，按本文方法计算得到的框架梁累积耗能的分布偏于安全，满足设计需要。

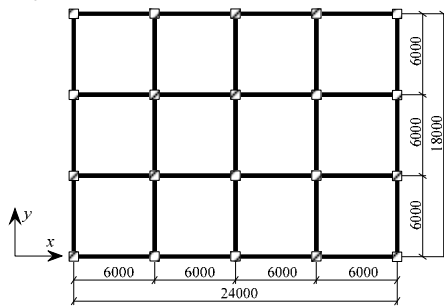


图 9 RC 框架结构平面图  
Fig. 9 Demonstration RC frame

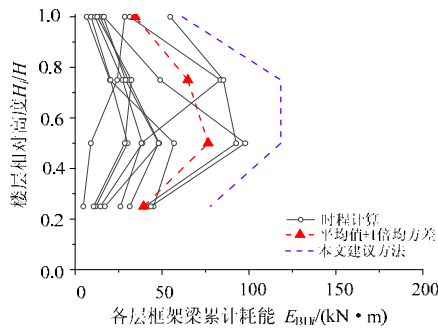


图 10 框架梁累积耗能沿楼层高度分布结果对比  
Fig.10 Comparison of distribution of energy dissipated by frame beams along structural height

## 4 RC 框-剪结构基于能量抗震设计方法

### 4.1 RC 框-剪结构损伤耗能机制控制

RC 框-剪结构主要包含四类构件：框架梁、框架柱、墙肢和连梁。由于墙肢和框架柱是框-剪结构中的主结构构件，同时墙肢在整体结构中主要承担侧向力，是 RC 框-剪结构中的关键构件，其抗震性能对整体结构的抗震性能至关重要。而连梁和框架梁屈服后对整体结构的竖向承载力影响较小，且通过合理设计可使其成为具有较大耗能能力的延性

耗能构件。因此强震作用下应尽量使 RC 框-剪结构由连梁和框架梁先屈服耗能，而推迟墙肢和框架柱的屈服，并控制其损伤程度。文献[54]的分析表明，RC 框-剪结构在强震作用下一般可形成“强墙肢弱连梁”和“强连梁弱墙肢”两种典型损伤耗能机制。图 11(a)“强墙肢弱连梁”机制是一种整体型耗能机制，以各楼层的连梁和框架梁耗能为主，由于在水平地震作用下连梁对层间侧移变形更敏感，因此连梁是 RC 框-剪结构中的主要耗能构件，框架梁则为辅助耗能构件。作为 RC 框-剪结构关键构件的墙肢仅在底部屈服耗能，同时框架柱基本保持弹性，维持其竖向承载能力。图 11(b)的“强连梁弱墙肢”屈服机制则由于中上部楼层的连梁不易屈服耗能，导致中上部墙肢形成局部损伤耗能集中，且具体位置有一定的随机性，结构无法形成稳定的耗能机制。因此，为实现 RC 框-剪结构基于能量抗震设计，应以“强墙肢弱连梁”机制作为合理损伤耗能机制的控制目标，而应避免“强连梁弱墙肢”机制。

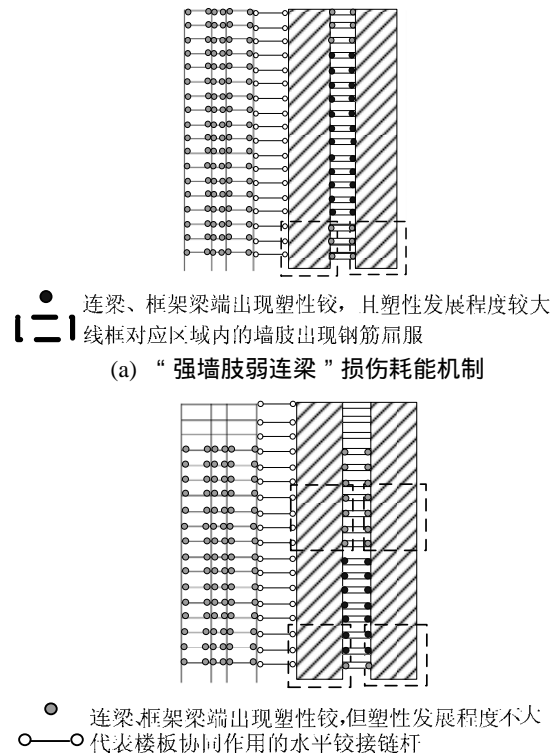


图 11 RC 框-剪结构两种典型的损伤耗能机制  
Fig. 11 Energy dissipation mechanism of RC frame-shear-wall structure

文献[55]以联肢墙整体系数 $\alpha$ 作为反映连梁与墙肢相对刚度比的参数，墙肢截面轴向变形影响系数 $T_z$ 作为反映剪力墙洞口(连梁净跨度)相对大小的参数，框-剪结构刚度特征值 $\lambda$ 作为反映框架与剪力



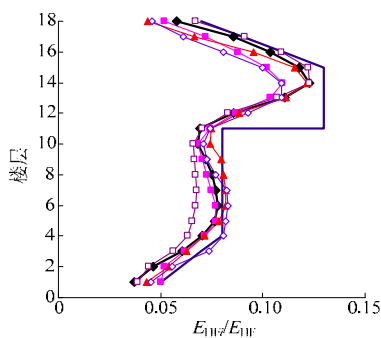
墙总抗侧刚度相对大小的参数,对大量不同 $\alpha$ 、 $T_Z$ 、 $\lambda$ 参数情况的 RC 框-剪结构算例进行了多条地震动输入下的弹塑性时程计算,给出了 $\alpha$ 、 $T_Z$ 、 $\lambda$ 参数与结构耗能机制类型的关系,结果表明: $T_Z$ 和 $\alpha$ 是影响框-剪结构耗能机制的关键因素;对于给定参数 $T_Z$ ,只有使 $\alpha$ 不超过相应的界限值,才能实现“强墙肢弱连梁”机制; $\lambda$ 主要影响连梁与框架梁之间的耗能分配比例,其数值变化不会明显改变 RC 框-剪结构的耗能机制类型。据此给出了式(2)所示由 $\alpha$ 、 $T_Z$ 和结构总高度 $H$ 所表达的“强墙肢弱连梁”机制的设计控制条件。由于 RC 框-剪结构中小跨高比连梁难以实现“强墙肢弱连梁”机制,文献[55]建议采用双连梁或多连梁,可使框-剪结构满足“强墙肢弱连梁”机制的条件。

$$\alpha < (0.45T_Z - 0.28)H, (\alpha > 1 \text{ 且 } T_Z \leq [T_Z]) \quad (2)$$

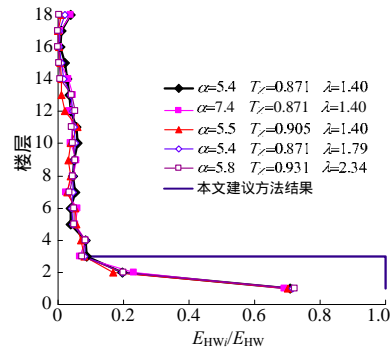
式中, $T_Z$ 为联肢剪力墙过渡到壁式框架的界限值。

#### 4.2 RC 框-剪结构耗能分布计算

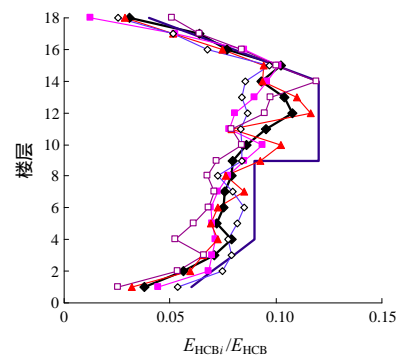
当 RC 框-剪结构满足式(2)“强墙肢弱连梁”损伤耗能机制条件的前提下,文献[55]分别研究了总累积滞回耗能 $E_H$ 在各类耗能构件中的分配,结果表明框架梁、墙肢、连梁各自的总累积滞回耗能 $E_{HF}$ 、 $E_{HW}$ 和 $E_{HCB}$ 分别与结构总累积滞回耗能 $E_H$ 之比 $E_{HF}/E_H$ 、 $E_{HW}/E_H$ 、 $E_{HCB}/E_H$ 具有明显的规律性,并提出了相应的简化计算公式。同时,文献[55]对经过“强墙肢弱连梁”损伤耗能机制控制设计的 RC 框-剪结构累积耗能沿楼层高度分布的研究显示,框架梁和连梁的累积耗能沿楼层高度方向均呈现稳定的分布模式(图 12(a)、图 12(c)),而墙肢的累积耗能则基本集中在底部加强区(图 12(b))。据此,文献[55]提出了 RC 框-剪结构中框架梁和连梁的耗能沿楼层高度分布的简化计算公式。另外,与 RC 框架结构的耗能分布计算类似,可采用 MPA 方法近似确定每层同类构件的累积耗能分布。综上,可按图 13 所示流程计算 RC 框-剪结构各构件的累积耗能需求。



(a) 框架



(b) 墙肢



(c) 连梁

图 12 18 层 RC 框-剪结构算例各类构件累积耗能沿楼层分布

Fig.12 Energy distribution of elements along structural height(18-story structure)

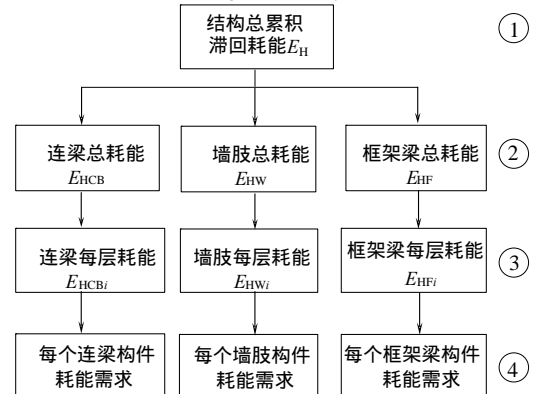


图 13 RC 框-剪结构的耗能分布计算流程

Fig.13 Procedure for calculating cumulative dissipated energy distribution in RC frame-shear-wall structures

#### 4.3 RC 框-剪结构构件耗能损伤评价和设计

与 RC 框架结构类似,在确定 RC 框-剪结构中的所有连梁、框架梁和底部加强区墙肢的累积耗能需求后,可以同时结合各耗能构件的最大塑性变形需求,采用 Park-Ang 模型进行 RC 构件的损伤评价,保证各类构件在地震作用下有足够的塑性变形和累积滞回耗能能力。基于上述方法对一 20 层规则 RC 框-剪结构在 $y$ 向进行基于能量抗震设计。结构

平面尺寸如图 14，层高均为 3.6m，8 度抗震设防，地震分组为第一组，二类场地。其它设计信息详见文献[55]。结构承载力设计仍根据规范进行，按式(2)进行“强墙肢弱连梁”耗能机制控制条件验算并适当调整连梁尺寸，最终确定结构的构件尺寸和纵筋配置。然后，分别采用前两阶段组合的 MPA 方法确定各构件的弹塑性变形需求，再按 4.2 节流程计算各构件的累积耗能需求。在此基础上完成构件耗能损伤评价和能力设计[55]。

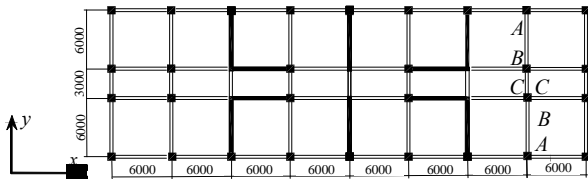
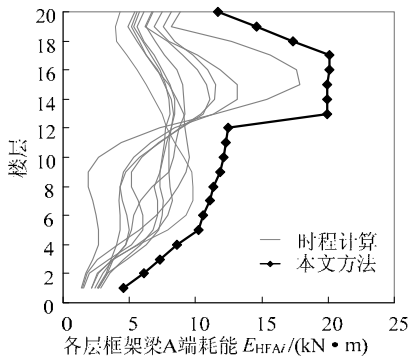


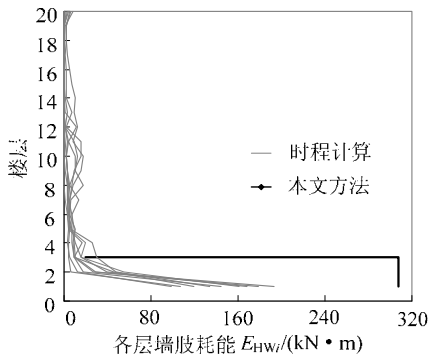
图 14 RC 框-剪结构平面布置图

Fig. 14 Demonstration RC frame-shear wall structure

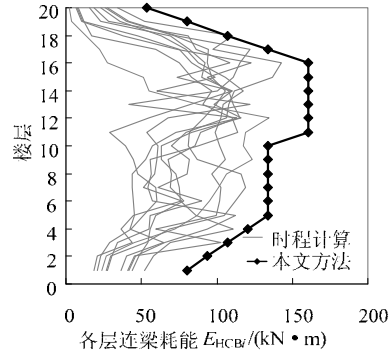
同样利用 10 条强震记录对所设计的 RC 框-剪结构进行弹塑性时程分析，由计算得到的各类构件的累积耗能沿楼层高度分布及其与本文方法的计算结果对比如图 15 所示。可见，本文基于能量抗震设计方法可以较准确地计算 RC 框-剪结构构件的累积耗能需求。



(a) 框架梁 A 端耗能



(b) 墙肢耗能



(c) 连梁耗能

图 15 时程计算结果与本文方法确定的构件耗能需求对比

Fig.15 Comparison between nonlinear time-history analysis and the proposed method

### 5 结论

本文介绍了目前基于能量抗震设计的研究现状，并系统总结了作者关于基于能量结构抗震设计方法的相关研究工作，指出结构的耗能机制控制是实现基于能量抗震设计方法的前提，据此提出了基于能量抗震设计方法的实施框架，并建议了基于能量结构抗震设计流程。在此基础上，分别针对钢支撑框架结构、RC 框架结构和 RC 框-剪结构，阐述了合理损伤耗能机制控制的条件和基于能量抗震设计方法的具体应用。

需要说明的是，本文介绍的基于能量抗震设计方法均以相应的合理损伤耗能机制控制为前提。目前各类结构的损伤耗能机制控制条件都是基于对大量规则结构算例的研究而提出的，因此所建立的基于能量抗震设计方法暂时只适用于质量和刚度沿竖向均匀分布、结构平面总体对称布置，扭转效应较小的结构。对于平面布置不对称，竖向刚度有突变层等不规则结构，需对其合理的损伤耗能机制控制条件进行论证后可按本文方法进行基于能量设计。

### 参考文献：

- [1] Housner G W. Limit design of structures to resist earthquakes [C]. Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Institute, 1956: 1-12.
- [2] Akiyama H. Earthquake resistant limit state design for buildings [M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1985: 23-30.
- [3] Fajfar P, Vidic T, Fischinger M. Seismic demand in medium- and long-period structures [J]. Earthquake

- Engineering & Structural Dynamics, 1989, 18(4): 1133 1144.
- [4] Uang C M, Bertero V V. Evaluation of seismic energy in structures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19(1): 77 90.
- [5] Nurtug A, Sucuoglu H. Prediction of seismic energy dissipation in SDOF systems [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24(9): 1215 1223.
- [6] 肖明葵, 刘波, 白绍良. 抗震结构总输入能量及其影响因素分析[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(2): 21 33. Xiao Mingkui, Liu Bo, Bai Shaoliang. Analysis of the total energy and its influencing factors for seismic structures [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1996, 18(2): 21 33. (in Chinese)
- [7] Riddell R, Garcia J E. Hysteretic energy spectrum and damage control [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30(12): 1791 1816.
- [8] 程光煜, 叶列平. 弹塑性 SDOF 系统的地震输入能量谱[J]. 工程力学, 2008, 25(2): 28 39. Cheng Guangyu, Ye Lieping. Earthquake input energy spectrum for inelastic SDOF systems [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2): 28 39. (in Chinese)
- [9] 程光煜, 叶列平. 弹塑性 SDOF 系统累积滞回耗能谱[J]. 工程抗震与结构加固, 2007, 29(2): 1 7. Cheng Guangyu, Ye Lieping. Cumulative hysteretic energy spectra of SDOF systems [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(2): 1 7. (in Chinese)
- [10] 程光煜, 叶列平. 弹塑性 MDOF 系统地震输入能量研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(6): 29 35. Cheng Guangyu, Ye Lieping. Earthquake energy input of inelastic MDOF systems [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(6): 29 35. (in Chinese)
- [11] Prasanth T, Ghosh S, Collins K R. Estimation of hysteretic energy demand using concepts of modal pushover analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37(6): 975 990.
- [12] Chopra A K, Goel R K. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 561 582.
- [13] Chopra A K, Goel R K. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, 33(8): 903 927.
- [14] Rathore M, Chowdhury A R, Ghosh S. Approximate methods for estimating hysteretic energy demand on plan-asymmetric buildings [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2011, 15(1): 99 123.
- [15] Akbas B, Shen J, Hao H. Energy approach in performance-based seismic design of steel moment resisting frames for basic safety objective [J]. Structural Design of Tall Buildings, 2001, 10(3): 193 217.
- [16] Shen J, Akbas B. Seismic energy demand in steel moment frames [J]. Journal of Earthquake Engineering, 1999, 3(4): 519 559.
- [17] 肖明葵. 基于性能的抗震结构位移及能量反应分析方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004. Xiao Mingkui. Analysis method of displacement and energy responses for evaluating the performance of seismic structures [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [18] 史庆轩, 熊仲明, 李菊芳. 框架结构滞回耗能在结构层间分配的计算分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005, 37(2): 174 188. Shi Qingxuan, Xiong Zhongming, Li Jufang. Calculation analysis of the storey distribution of hysteretic energy for frame structures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2005, 37(2): 174 188. (in Chinese)
- [19] 刘哲锋, 沈蒲生. 高层混合结构滞回耗能分布规律的研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(5): 7 11. Liu Zhefeng, Shen Pusheng. Evaluation of hysteric energy to input energy ratio in tall hybrid structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(5): 7 11. (in Chinese)
- [20] Akbas B, Tugsal U M, Kara F I. An evaluation of energy response and cumulative plastic rotation demand in steel moment-resisting frames through dynamic/static pushover analyses [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(4): 405 426.
- [21] Bojorquez E, Ruiz S E, Teran-Gilmore A. Reliability-based evaluation of steel structures using energy concepts [J]. Engineering Structures, 2008, 30(6): 1745 1759.
- [22] Bojorquez E, Reyes-Salazar A, Teran-Gilmore A, Ruiz S E. Energy-based damage index for steel structures [J]. Steel and Composite Structures, 2010, 10(4): 331 348.
- [23] Fajfar P, Gaspersic P. The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1996, 25(1): 31 46.
- [24] Chou C C, Uang C M. A procedure for evaluating seismic energy demand of framed structures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32(2): 229 244.
- [25] 朱建华, 沈蒲生. 基于能量原理的钢筋混凝土筒体结构抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 109 113. Zhu Jianhua, Shen Pusheng. Seismic analysis of reinforced concrete frame-core structures based on energy concept [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5): 109 113. (in Chinese)
- [26] Benavent-Climent A, Zahran, R. An energy-based

- procedure for the assessment of seismic capacity of existing frames: Application to RC wide beam systems in Spain [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(5): 354–367.
- [27] 叶列平, 程光煜, 曲哲, 陆新征. 基于能量抗震设计方法研究及其在钢支撑框架结构中的应用[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(11): 53–62.  
Ye Lieping, Cheng Guangyu, Qu Zhe, Lu Xinzheng. Study on energy-based seismic design method and application on steel braced frame structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(11): 53–62. (in Chinese)
- [28] Gupta A, Krawinkler H. Behavior of ductile SMRFs at various seismic hazard levels [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2000, 126(1): 98–107.
- [29] Park Y J, Ang A S, Wen Y K. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1985, 111(4): 740–757.
- [30] McCabe S L, Hall W J. Assessment of seismic structural damage [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1989, 115(9): 2166–2183.
- [31] Kunnath S K, Chai Y H. Cumulative damage-based inelastic cyclic demand spectrum [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33(4): 499–520.
- [32] Colombo A, Negro P. A damage index of generalized applicability [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27: 1164–1174.
- [33] Teran-Gilmore A, Jirsa J O. A damage model for practical seismic design that accounts for low cycle fatigue [J]. *Earthquake Spectra*, 2005, 21(3): 803–832.
- [34] Rodriguez M E, Padilla D. A damage index for the seismic analysis of reinforced concrete members [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2009, 13(3): 364–383.
- [35] Fajfar P. Equivalent ductility factors taking into account low-cycle fatigue [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21(10): 837–848.
- [36] Teran-Gilmore A, Avila E, Rangel G. On the use of plastic energy to establish strength requirements in ductile structures [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(7): 965–980.
- [37] Park Y J, Ang H S, Wen Y K. Damage-limiting aseismic design of buildings [J]. *Earthquake Spectra*, 1987, 3(1): 1–26.
- [38] Krawinkler H, Zohrei M. Cumulative damage in steel structures subjected to earthquake ground motions [J]. *Computers and Structures*, 1983, 16: 531–541.
- [39] Benavent-Climent A. An energy-based damage model for seismic response of steel structures [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36: 1049–1064.
- [40] BSSC. FEMA-450. NEHRP Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures [S]. Washington, D.C.: Building Seismic Safety Council, 2004.
- [41] Leelataviwat S, Goel S C, Stojadinovic B. Energy-based seismic design of structures using yield mechanism and target drift [J]. *Journal of Structural Engineering* 2002, 128(8): 1046–1054.
- [42] 白久林, 欧进萍. 基于能量平衡的钢筋混凝土框架结构抗震塑性设计方法[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(10): 22–31.  
Bai Jiulin, Ou Jinping. Seismic plastic design of RC frame structure based on energy balance [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(10): 22–31. (in Chinese)
- [43] Choi H, Kim J. Energy-based seismic design of buckling-restrained braced frames using hysteretic energy spectrum [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(2): 304–311.
- [44] Choi H, Kim J. Evaluation of seismic energy demand and its application on design of buckling-restrained braced frames [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2009, 31(1): 93–112.
- [45] Benavent-Climent A. An energy-based method for seismic retrofit of existing frames using hysteretic dampers [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(10): 1385–1396.
- [46] Habibi A, Chan R W K, Albermani F. Energy-based design method for seismic retrofitting with passive energy dissipation systems [J]. *Engineering Structures*, 2013, 46(1): 77–86.
- [47] 叶列平, 陆新征, 马千里, 程光煜, 宋世研, 缪志伟, 潘鹏. 屈服后刚度对建筑结构地震响应影响的研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(2): 17–29.  
Ye Lieping, Lu Xinzheng, Ma Qianli, Cheng Guangyu, Song Shiyuan, Miao Zhiwei, Pan Peng. Study on the influence of post-yielding stiffness to the seismic response of building structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(2): 17–29. (in Chinese)
- [48] Whittaker A S, Uang C M, Bertero V V. Seismic testing of eccentrically braced dual steel systems [J]. *Earthquake Spectra*, 1989, 5(2): 429–449.
- [49] Connor J J, Wada A, Iwata M, Hunag Y H. Damage-controlled structures. 1: Preliminary design methodology for seismically active regions [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1997, 123(4): 423–431.
- [50] Harada Y, Akiyama H. Seismic design of flexible-stiff mixed frame with energy concentration [J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(12): 1039–1044.
- [51] 马千里. 钢筋混凝土框架结构基于能量抗震设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.  
Ma Qianli. Study on energy-based seismic design methodology for reinforced concrete frame structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)

(参考文献[52] [55]转第 20 页)

- 率约束下桁架拓扑优化[J]. 计算力学学报, 2011, 28(1): 1-7.
- Liu Xiaofeng, Yan Jun, Cheng Gengdong. Topology optimization of skeletal structures with frequency constraints based on automatic grouping genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Computational, 2011, 28(1): 1-7. (in Chinese)
- [8] 邱海, 隋允康, 叶红玲. 频率约束板结构拓扑优化[J]. 固体力学学报, 2012, 33(2): 189-198.
- Qiu Hai, Sui Yunkang, Ye Hongling. Topological optimization of the plate structure subjected to the frequency constraints [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2012, 33(2): 189-198. (in Chinese)
- [9] Ma Z D, Kikuchi N, Hagiwara I. Structural topology and shape optimization for a frequency response problem [J]. Computational Mechanics, 1993, 13(3): 157-174.
- [10] Allahdadian S, Boroomand B, Barekatein A R. Towards optimal design of bracing system of multi-story structures under harmonic base excitation through a topology optimization scheme [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2012, 61(11): 60-74.
- [11] Kang Z, Zhang X, Jiang S, et al. On topology optimization of damping layer in shell structures under harmonic excitations [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2012, 46(1): 51-67.
- [12] Rong J H, Xie Y M, Yang X Y, et al. Topology optimization of structures under dynamic response constraints [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(2): 177-189.
- [13] 张桥, 张卫红, 朱继宏. 动力响应约束下的结构拓扑优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 45-51.
- Zhang Qiao, Zhang Weihong, Zhu Jihong. Topology optimization of structures under dynamic response constraints [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 45-51. (in Chinese)
- [14] Motamari P, Ramani A, Kaushik A. Structural topology synthesis with dynamics and nonlinearities using equivalent linear systems [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2012, 45(4): 545-558.
- [15] Sigmund O, Petersson J. Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima [J]. Structural Optimization, 1998, 16(1): 68-75.
- [16] Sigmund O, Maute K. Sensitivity filtering from a continuum mechanics perspective [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2012, 46(4): 471-475.
- [17] Guest J K, Prevost J H, Belytschko T. Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 61(2): 238-254.
- [18] 隋允康. 建模·变换·优化—结构综合方法新进展[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996: 177-195.
- Sui Yunkang. Modeling, transformation and optimization: New developments of structural synthesis method [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1996: 177-195. (in Chinese)
- [19] 隋允康, 叶红玲, 刘建信, 等. 追究根基的结构拓扑优化方法[J]. 工程力学, 2008, 25(增刊 2): 7-19.
- Sui Yunkang, Ye Hongling, Liu Jianxin, et al. A structural topological optimization method based on exploring conceptual root [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(Suppl 2): 7-19. (in Chinese)
- [20] 隋允康, 宣东海, 叶红玲, 铁军. 阶跃函数高精度逼近的结构拓扑优化方法[J]. 计算力学学报, 2010, 27(6): 959-967.
- Sui Yunkang, Xuan Donghai, Ye Hongling, Tie Jun. Structural topology optimization method using high accuracy approximation of the step function [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(6): 959-967. (in Chinese)
- [21] 张可村, 李换琴. 工程优化方法及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 21-22.
- Zhang Kecun, Li Huanqin. Engineering optimization method and its application [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007: 21-22. (in Chinese)

(上接第 12 页)

- [52] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 钢筋混凝土框架结构强柱弱梁设计方法的研究[J]. 工程力学, 2010, 27(12): 102-113.
- Ye Lieping, Ma Qianli, Miao Zhiwei. Study on weak beam-strong column design method of RC frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 102-113. (in Chinese)
- [53] 徐福江. 钢筋混凝土框架-核心筒结构基于位移抗震设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- Xu Fujiang. Studies on displacement-based seismic design methodology of reinforced concrete frame-core wall structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
- [54] 缪志伟, 叶列平. 罕遇地震作用下钢筋混凝土框架-剪力墙结构的耗能机制分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 27-34.
- Miao Zhiwei, Ye Lieping. Study on energy dissipation mechanism of reinforced concrete frame-shear-wall structure under severe earthquakes [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 27-34. (in Chinese)
- [55] 缪志伟. 钢筋混凝土框架剪力墙结构基于能量抗震设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- Miao Zhiwei. Study on energy-based seismic design methodology for reinforced concrete frame-shear wall structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)