

## “破坏-安全”结构抗震理念及其应用

曲哲 叶列平

(清华大学土木工程系, 教育部结构工程与振动重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 目前我国房屋建筑抗震采用的以小震弹性计算为基础的设计方法, 使工程师忽视了对建筑结构在强烈地震作用下破坏模式的充分考虑与设计, 使得建筑结构的大震安全性有时难以保证。“破坏-安全”抗震理念, 是以房屋建筑最重要的抗震安全性能为目标, 首先要求设计人员对结构的预期破坏模式有充分的把握和控制, 并使结构在强烈地震作用下能够形成明确的预期破坏模式并具备一定的耗能能力, 从而以经济的代价保证结构其余部分在强烈地震作用下的安全。本文结合我国汶川地震灾后恢复重建与加固改造的实际情况, 介绍了“破坏-安全”抗震理念及其设计概念, 并介绍了国内外研究人员与工程人员在实现“破坏-安全”抗震理念方面所提出的创新抗震结构体系及其研究成果。希望该能够实现最重要的抗震安全、且经济合理的结构抗震理念和相关技术能够在我国推广应用, 以全面提高我国经济欠发达地区房屋建筑的抗震安全性。

**关键词:** 房屋建筑; 结构体系; 破坏-安全; 破坏模式; 耗能

## Fail-safe seismic design and its applications

Qu Zhe, Ye Lieping

(Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry  
Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

**Abstract:** The current design method in the seismic design code takes the structural elastic response subjected to minor earthquakes as the basis for structural design. This makes engineers tend to pay little attention to designing and controlling the structural failure mechanism under rare earthquakes. Thus, the seismic safety of building structures subjected to rare earthquakes is not always guaranteed. The fail-safe design aims at the seismic safety, the most important seismic performance of building structures. It requires the engineers to fully understand the damage and failure behavior of the structure to be designed. By achieving the carefully chosen failure mechanism, the structure is expected to gain adequate energy-dissipating capacity and survive rare earthquakes with acceptable cost. Focusing on the rehabilitation of the Wenchuan earthquake, the basic concepts, as well as some recent development and applications of the fail-safe design are introduced. The fail-safe design is believed to be an effective and economical solution for improving the seismic safety of the building structures all over our country and be especially valuable for the developing regions.

**Keywords:** building structure, structural system, fail-safe, failure mechanism, energy dissipation

---

基金项目 国家自然科学基金重大研究计划重点项目 (90815025)、建设部专题项目资助

[收稿日期] 2009-04-16

[作者简介] 曲哲, 男, 生于 1983 年, 博士研究生。主要研究方面: 基于损伤控制的建筑结构抗震设计。

E-mail: qz@mails.tsinghua.edu.cn

## 1 “破坏-安全”抗震理念

经过一百多年的发展, 现行房屋建筑抗震设计方法在对结构抗震性能的理解与控制方面已经取得了巨大的进步。但与此同时, 一个多世纪以来的历次大地震仍总是给人类社会造成出乎意料的损失, 尤其是特大地震中房屋建筑的倒塌所造成的重大人员伤亡。2008年5月12日的汶川大地震在我国经济欠发达地区造成的巨大灾难, 迫使我国的结构工程师们不得不更多的关注大量经济实用房屋建筑结构的抗震安全性问题。1978年唐山地震中大量砌体结构房屋倒塌所造成的巨大损失同样引起了广泛的关注, 但在一片废除砌体结构的呼声中, 砌体结构仍然是我国经济欠发达地区的主要建筑形式。汶川地震中, 砌体结构房屋的倒塌破坏再一次成为造成巨大人员伤亡与经济损失的主要原因之一, 这突出地反映了我国地震工程界30年来对于经济欠发达地区大量存在的传统砌体结构等经济简易的建筑物的抗震性能缺乏反思, 相关研究和抗震技术措施的推行缺乏力度。经济欠发达地区的建筑抗震问题不能消极地用废除某种结构形式的方法来对待, 也不能不顾经济条件而盲目推广先进的建筑抗震技术, 而应结合自身抗震性能较差却又普遍存在的各类结构的特点, 针对经济欠发达地区建筑抗震设防的首要目标, 即安全性目标, 反思目前结构抗震设计中存在的问题, 寻找适合于经济欠发达地区现实经济条件的建筑抗震解决方案。在这方面, 本文所讨论的“破坏-安全”抗震理念及其相关研究和案例值得借鉴和推广应用。

### 1.1 “破坏-安全”抗震理念的含义

依据损失与经济均衡的原则, 房屋建筑结构在强烈地震下发生一定程度的损伤乃至破坏是不可避免的, 但应满足安全性的目标, 即应避免房屋建筑倒塌造成人员伤亡。早在20世纪中期, 结构工程师就意识到结构中部分构件达到其承载力后的延性对于结构抗震能力的重要意义。在强烈地震作用下, 结构中部分构件发生损伤以至破坏, 改变结构的动力特性并耗散地震输入能量, 能够保护结构的其他部分免受破坏。由于未来发生大地震的不确定性以及社会经济条件的制约, 利用结构中部分构件损伤后的延性和耗能能力来提高结构的抗震能力, 是比单纯追求更高承载力更加可行的方法。为此, 世界上主要的建筑结构抗震设计规范均引入了承载力降低系数的概念, 考虑结构部分损伤破坏构件的延性和耗能能力对结构抗震能力的贡献。如美国现行的抗震规范 **ASCE 7 (2005)** 基于早年关于弹塑性反应谱以及  $R-\mu-T$  关系的研究成果, 确定了不同类型结构的承载力降低系数  $R$  和变形调整系数  $C_d$ , 以对一般建筑的承载力需求和变形验算结果做出修正。我国 **78 规范 (1978)** 也基本采用了这一做法。日本《**建筑基准法 (2004)**》中的保有水平耐力计算中则采用结构影响系数  $D_s$  来考虑结构部分损伤破坏构件的延性和耗能能力对结构承载力需求的折减。20世纪七八十年代由 **Pauley 等 (1980, 1983, 1992)** 提出的能力设计法在结构抗震设计中更加深入地考虑了构件损伤对于结构抗震性能的影响, 提出了以控制结构的损伤模式为前提的能力设计法思想, 并根据结构预期损伤模式的研究得到了一些能够直接指导结构抗震设计的承载力级差系数。抗震设计方法中的这些变化, 都直接反映出在一定的社会经济条件下, 结构在强烈地震作用下发生损伤以至部分破坏是不可避免的, 并且是可以加以利用的。

然而, 现行考虑结构延性对结构承载力需求折减的抗震设计方法 (包括中国按小震计算结构承载力需求和保证结构延性措施的设计方法), 对一般结构 (尤其是经济欠发达地区的一般房屋建筑) 都没有要求工程师在设计中直接对损伤模式进行设计计算控制。由于现行基于结构弹性受力分析并获得组合设计内力所进行的在构件层面上的这种抗震设计方法, 其后果是结构工程师很难充分把握结构在线弹性范围之外的实际抗震行为, 然而这时结构的行为和破坏状态恰恰对于结构在强震作用下的抗震安全性至关重要。因此, 目前的抗震设计方法的现状是, 建筑结构最重要的抗震性能——安全性, 无论对于工程师、业主还是公众都不明确。这是本末倒置的。

“破坏-安全”抗震理念在维持现行结构抗震设计原则的前提下, 更加突出地明确结构

在强烈地震下的损伤破坏部位,并通过这些预期部位的损伤与破坏,达到保证建筑结构内(非预期损伤和破坏部位)人员安全的目标。“破坏-安全”抗震理念主要针对经济欠发达地区大量存在的一般建筑结构,在不过多增加结构建造成本的前提下实现结构抗震安全性这一最重要的目标。所谓“破坏”,即承认建筑结构在一定强烈地震作用下必然要发生局部破坏,在结构抗震设计中必须考虑结构在发生局部破坏后的抗震性能。所谓“安全”,即要求在建筑结构遭受局部破坏时,仍能保证整体结构安全,及不因结构倒塌而造成人员伤亡。因此,“破坏-安全”抗震理念符合经济欠发达地区的实际需求,即以最低的经济代价达到最重要的抗震设防目标—生命安全。

## 1.2 基于“破坏-安全”抗震理念的结构概念设计

基于“破坏-安全”抗震理念的结构概念设计应主要遵循以下两条原则:

第一,应通过充分可靠的措施和方法控制结构在强烈地震下的预期损伤破坏部位,且损伤破坏部位不会影响建筑物内人员的生命安全。由于未来地震作用的不确定性以及结构本身在材料、施工与使用期间存在的种种不确定因素,为实现预期的破坏模式,必须通过充分可靠的措施和方法来控制结构在强烈地震作用下的变形模式。一般来说,结构预期的破坏模式越简单越明确,就越容易控制。

第二,在实现强烈地震下结构预期损伤破坏模式的前提下,尽可能提高结构的耗能能力。结构中损伤与破坏的部位有助于耗散地震输入能量,从而使结构的其余部分免受破坏,提供安全的生存空间。

在上述两条设计概念中,控制结构的损伤破坏模式是重中之重,也是实现结构耗能能力的前提。损伤破坏模式控制与结构耗能能力,两者是相互关联的,是实现所希望的“安全”目标的不可或缺的两个方面。应该说,现行结构抗震设计方法中也强调结构在地震作用下的“损伤破坏模式”,即通过一定的承载力级差调整来控制结构破坏模式的方法,但实际震害表明这种方法的效果并不好,其原因在于如真正实现现行抗震设计方法中所预期的破坏模式,其经济代价过高。以框架结构为例,“强柱弱梁”机制是框架结构所希望的破坏模式,然而汶川地震表明,目前抗震规范中所给出的柱端弯矩增大系数不足以在强烈地震下的实现“强柱弱梁”机制。有研究表明,按实配钢筋计算的柱端弯矩增大系数要达到 2.0 以上,才具有一定的保证率使框架结构实现“强柱弱梁”机制,而如果遭遇超大震水准的强烈地震,则柱端弯矩增大系数可能需要更大 (Dooley, 2001)。按这一要求进行设计,框架柱的配筋量势必显著增大,我国目前的经济水平似乎还不能接受这种经济上的代价。

如前所述,由于“破坏-安全”抗震理念首先把设计目标集中于通过结构中部分部位的破坏来实现“安全”的目标上,因此通过降低预设部位的承载力来实现结构的损伤破坏模式控制,不会显著增加结构的造价。因此,基于控制结构破坏模式的“破坏-安全”抗震理念来构建新型的结构体系更加有效,因为这种控制结构的破坏模式方法不仅要依靠设计与分析手段的进步,更重要的是需要结构工程师根据长期震害的经验积累和智慧,提出结构体系层次的创新。隔震结构与摇摆耗能结构就是这种结构体系创新的成功代表,以下结合国内外隔震结构与摇摆耗能结构的发展,具体阐述“破坏-安全”结构理念的实际应用,并结合具体结构形式的特点,讨论设计原则。

## 2 隔震结构

利用建筑物基础底部滑动来隔离地震动输入的想法已有近百年的历史。20 世纪 70 年代叠层橡胶隔震支座的成功开发使建筑隔震成为一项专门技术并逐渐在世界范围内得到广泛应用。目前已有许多种不同原理的隔震支座以及用于隔震层的阻尼器可供选择,但对于我国大量存在的砌体结构等低造价一般建筑,推广这种使用专门隔震装置的隔震技术并不具备现实的经济条件。隔震结构作为一种将变形(破坏)几乎全部集中在隔震层的结构形式,其变

形(破坏)模式很容易控制,并且可以利用隔震层变形集中的特点,在隔震层设置耗能装置或采用其他方法提高结构耗能能力。因此,隔震结构符合“破坏-安全”抗震设计的基本概念。如果能不采用昂贵的现代隔震装置,而实现类似的隔震效果,则可以以非常经济的代价实现“破坏-安全”的抗震设计。滑动基础隔震和软弱底层隔震即属于此类。

## 2.1 滑动基础隔震

王文明(1991)报告了我国历史上几次大地震中发现的因为房屋底部出现水平滑动破坏裂缝而使上部结构得以保全的实例,如1969年渤海地震中,在VIII度半区内有许多土坯房因为在墙根处设有约10cm厚的芦苇防潮层,起到了隔震的作用而没有倒塌。又如1978年唐山地震中,在X度区有两幢相距仅10m的相同的三层砖房,震后一幢完全倒塌而另一幢未毁。调查发现未倒塌的一幢砖房在墙根处整个建筑物有一条水平获得破坏裂缝,砖墙上下部分有约6cm的残余位移。这条水平裂缝也起到了隔震的作用。在2008年的汶川地震中,类似的现象也有出现。震害调查中发现有些建筑物在底部地平以上出现通长的水平裂缝,如图1所示的绵竹某砌体结构房屋在地梁顶面出现的裂缝,客观上起到了隔震的作用,上部结构的震害明显减轻。



图1 汶川地震中绵竹某砌体结构房屋的底部水平裂缝(李爱群)

Figure 1 Bottom horizontal cracks of a masonry building in Mianzhu in Wenchuan earthquake (photo by Li Aiqun)

王文明(1991)提出了一种用于抗震能力较弱、延性较差的结构(如砌体结构,土坯结构等)的经济简便的砂层隔震做法,即在基础高出室外地坪100mm左右处砌筑一层磨石板,光滑面向上。在上面铺一层经过筛选的砂粒,再在砂层上砌筑一层磨石板,光滑面向下。之后即可按照传统的方法在磨石板上建造房屋,如图2所示。为验证砂层隔震的有效性,文献0还进行了缩尺的振动台试验,如图3所示,试验模型为5个高700mm,宽800mm的土坯房,其底部通过砂层隔震缝与振动台相连。试验结果显示,5个模型在振动台激励下均在隔震缝处发生滑动,而上部土坯房则均免于倒塌。由此可见,对于土坯房这种承载力很低的房屋建筑,如果通过砂层隔震降低建筑底部承载力进行损伤破坏控制,可以以比较经济的代价有效实现“破坏-安全”抗震理念。

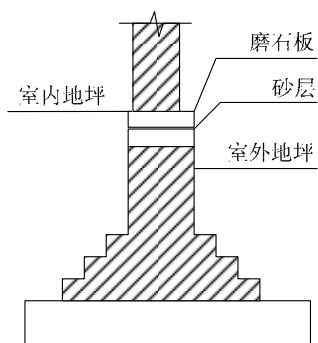


图 2 砂层隔震缝做法  
Figure 2 Base isolation with sand layers

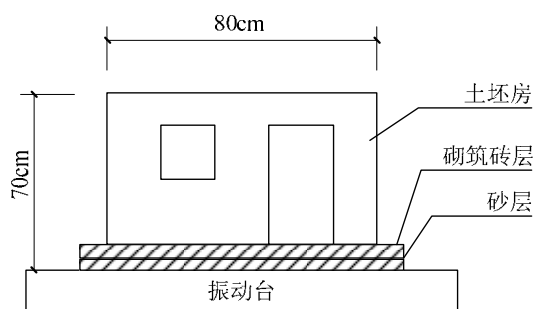


图 3 砂层隔震的振动台试验  
Figure 3 Shaking table test on base isolation with sand layers

2006 年, 日本学者在 E-Defense 进行了钢筋混凝土教学楼足尺模型的振动台试验 (Kabeyasawa), 并在试验中比较了非固结基础与固结基础对上部结构损伤破坏的影响, 验证了滑动基础的隔震效果。试验模型如图 4 所示, 为一座按照日本 1970 年抗震规范设计的三层钢筋混凝土教学楼, 其抗震能力不满足 1981 年新抗震规范的要求。该结构纵向三跨 (如图 4 所示), 横向两跨, 并在横向设置有结构墙。固结基础的教学楼的预期破坏模式是首层框架柱在纵向发生剪切破坏。

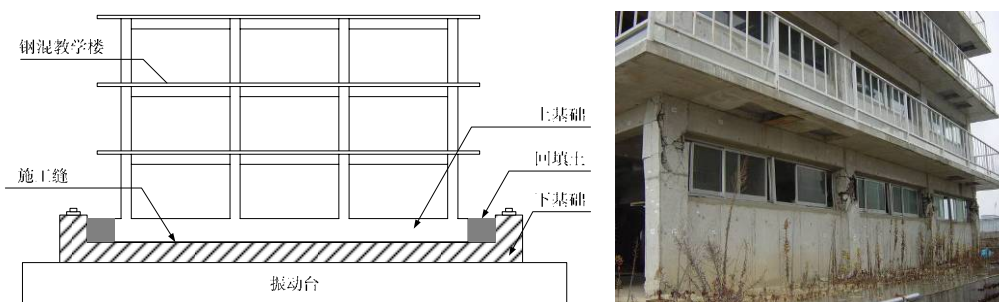
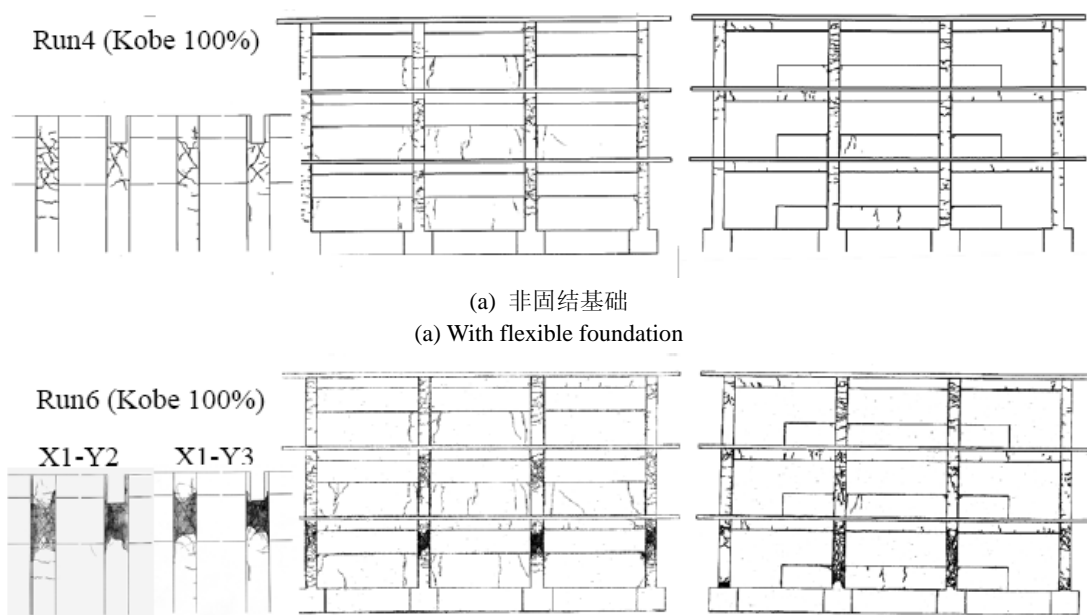


图 4 非固结基础上钢筋混凝土教学教足尺模型的 E-Defense 振动台试验立面示意图  
Figure 4 Full scale shaking table test on RC school building with flexible foundation at E-Defense



## (b) 固结基础

## (b) With rigid foundation

图 5 不同基础固定条件下教学楼在 100% JMA Kobe 地震作用下的破坏情况的对比 (Kabeyasawa)

Figure 5 Seismic damages of specimens with flexible and rigid foundation under 100% JMA Kobe ground motion

为了实现非固结基础, 该模型浇筑了两层混凝土基础, 如图 4 所示。浇筑时使下层基础顶面尽可能平整。在下层基础混凝土完全硬化后直接在下基础顶面浇筑上层基础板, 从而在两层基础板之间形成施工缝。上层基础板浇筑完成后在周边填充回填土。这样, 上下基础板只通过施工缝处的混凝土表面的接触作用和摩擦作用相连。在一般的风力或轻微地震引起的侧向作用下, 上、下层基础不会发生滑动, 与一般固结基础的情况相同。在强烈的地震作用下, 上、下层基础板之间的施工缝将发生滑动破坏, 由此起到隔震的作用, 施工缝处的摩擦还可以耗散地震输入能量, 从而减小隔震层变形。这样的“破坏-安全”设计的减震效果得到了试验的验证。图 5 比较了滑动基础与固结基础时结构在相同的地震动激励下的破坏情况。当采用滑动基础时, 当输入 100% 的日本海洋气象厅阪神地震波(JMA Kobe, PGA=818gal) 时, 上部结构只发生了轻微的破坏, 结构最大层间位移角仅为 1/250; 而固结基础的情况, 在同样的地震波输入下, 上部结构的首层发生了严重的破坏, 最大层间位移角达到 1/20。由此可见, 滑动基础具有显著的隔震效果, 实现了“破坏-安全”抗震理念。

无论是砂层隔震还是非固结基础隔震, 均是在不提高结构造价的前提下, 利用结构底部在强烈地震中发生相对滑动的“破坏模式”, 产生隔震效果, 由此减轻了上部结构的地震响应, 使上部结构免于严重破坏, 达到保障人员生命安全的目标。这种结构形式具有明确且易于控制的破坏模式, 即薄弱滑动层破坏, 且具有与破坏模式相适应的耗能模式, 即利用薄弱滑动层的摩擦作用耗能, 因此完全体现了“破坏-安全”抗震设计理念, 值得在低造价的小体量建筑结构中推广。

## 2.2 软弱底层隔震结构

与滑动基础隔震类似, 软弱底层隔震也是“破坏-安全”抗震理念的一个实际应用。国内外很多大地震中薄弱底层房屋建筑震害表明, 这类建筑的底部薄弱层往往震害十分严重, 甚至倒塌, 而上部结构则震害较轻, 甚至可以免于破坏。汶川地震灾区大量采用底框砖混结构, 在汶川地震中这类建筑出现了大量底层破坏而上部结构基本完好(安全)的震害实例, 如图 6 所示。



(a) 北川某底框住宅底层严重倾斜破坏  
(a) Large story drift at the first story



(b) 北川某底框住宅底层倒塌  
(b) Collapse of the first story



(c) 某底框住宅底层倒塌，二层花盆仍在原位  
(c) First story collapsed with the flower pots on the second story intact



(d) 映秀镇某宿舍底层倒塌  
(d) Collapse of the first story of a dorm building

图 6 汶川地震中软弱底层破坏的实例  
Figure 6 Soft story failures in Wenchuan earthquake



(a) 建筑全景  
(a) Overview



(b) 底层柱铰  
(b) Column plastic hinges at the first story

图 7 都江堰都江堰之春住宅区的 1 号公寓楼  
Figure 7 A residential building in Dujiangyan city

图 7 所示的都江堰都江堰之春 1 号公寓楼的震害更为典型。该 6 层框架结构首层为停车场，无填充墙；上部为公寓，有横向和纵向的填充墙，设防烈度为 7 度，遭遇烈度为 9 度。地震中，首层框架柱上下端均出现塑性铰，破坏较严重，层间侧移角达  $1/12$ ，首层楼梯间也严重破坏，但上部楼层基本完好，仅填充墙有轻度开裂。实际上，首层柱上下端出铰形成层屈服机制后，在一定程度上起到了隔震的效果。但这种破坏模式对目前的这种建筑状况是存在安全问题的，因为如果地震作用再强烈一些，整个底层很有可能被完全压溃，上部结构整体跌落，从而造成人员伤亡。因此，如果利用这种薄弱层的隔震效果，并进行合理的设计与可靠的控制，则可实现“破坏-安全”设计目标。为此，需要在实现柔性底层破坏模式的同时，能够保证柔性底层在丧失水平承载能力之后不同时丧失竖向承重能力，则可避免整个结构的倒塌，欧进萍等 (1995) 提出了如图 8 所示的由钢管混凝土柱、承重墙和隔震支座共同组成的“耗能-隔震”柔性底层。该柔性底层以钢管混凝土柱作为强震下的预期破坏部位，并利用钢管混凝土柱自身良好的滞回耗能能力来耗散地震输入能量以减小柔性底层的侧向位移，同时通过承重墙与上部结构之间的隔震支座形成变形集中层，并保证承重墙在强震下不会发生破坏以能够独立支承上部结构的全部重量。

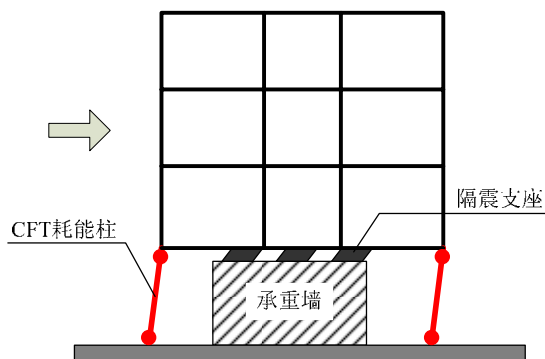


图8 “耗能-隔震”柔性底层结构示意图(欧进萍, 1995)  
Figure 8 Structure with flexible first story (Ou et al 1995)

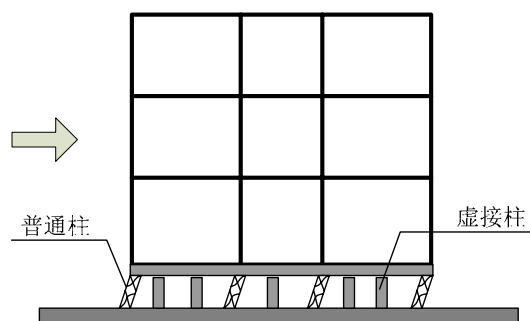


图9 密柱底层结构示意图  
Figure 9 Flexible first story composed of disconnected columns

图8所示的采用隔震支座与钢管混凝土柱的方案可能会较大的提高建设成本。其实,若人为地在建筑底部设置无人员使用建筑功能的软弱层(如储藏室),并保证其在强烈地震作用下软弱层丧失水平承载力时不至于丧失竖向承载能力,则可以像都江之春1号公寓楼那样既实现底层柔性隔震,有效地避免上部结构破坏,同时不会显著增加结构造价。柔性底层可由普通的钢筋混凝土柱和承重墙组成,承重墙顶面与上部楼层分离或仅通过一层松散砌筑的砖砌体连接。在正常使用情况下,混凝土柱与墙共同承载结构重量,在强烈地震下,混凝土柱发生破坏,承重墙顶面与上部楼层之间的连接也失效,结构的大部分重量转由承重墙承担,上部结构在墙顶滑动,整个结构可以通过墙顶的摩擦以及屈服后的混凝土柱的塑性变形耗散能量。与之类似,还可以如图9那样在建筑底部设置较矮的密柱层,不作为人员使用空间。密柱层中一半的柱与上部楼层正常连接(普通柱),另一半的柱与上部楼层之间不做可靠连接(虚接柱)。普通柱在平时承担结构重量并能抵抗设防烈度的地震水平作用,在强烈地震时破坏耗能,结构重量转由虚接柱承担,从而实现滑动隔震。

### 2.3 设计原则

基于“破坏-安全”抗震理念的结构设计的突出特点是要考虑结构按预期的模式破坏后的抗震性能。对于上述基础滑动或软弱底层隔震的结构,可以按以下原则进行结构设计。

(1) 计算上部结构在保持弹性或仅发生轻微破坏时能够承受的最大底部剪力 $Q_{\max}$ ,只需进行结构的线弹性分析或少量极限分析即可完成。结合我国现行抗震设计规范的体系,这一步可以按照仅考虑规范中的相应烈度区划的“小震”水平进行设计,即要求上部结构只满足“小震弹性”即可。

(2) 按 $Q_{\max}$ 设计基础滑动层或底部软弱层,保证其水平承载力小于 $Q_{\max}$ 。这需要通过试验研究充分掌握所设计类型的滑动基础或底部软弱层的承载力特性,同时应充分考虑保证底部软弱层在丧失水平承载力时不同时丧失竖向承载力的方法。如果隔震层设计合理,将能够保证上部结构不会受到超过当地“小震”水平的底部剪力作用。

(3) 近似偏于安全的考虑隔震层破坏后的耗能能力,验算所设计的隔震体系在强烈地震作用下的隔震层变形。对于中低层建筑,可以简单地将上部结构等效为单自由度质点,采用弹塑性动力时程、等价线性化分析或能量平衡分析等多种方法进行计算。结合我国规范,这一步应至少按“大震”作用进行验算,以保证结构在“大震”下的安全。

## 3 摇摆耗能结构

基于控制结构破坏模式和提高结构耗能能力两方面的设计概念,摇摆耗能结构也是一种有效的“破坏-安全”结构体系。图10(c)所示为摇摆墙-框架结构体系。摇摆耗能结构由刚度较大的摇摆子结构(如图10c中的摇摆墙)与结构其它部分连接,摇摆子结构底部以及摇摆子结构与结构其它部分相连的部位可以作为大震下的预设破坏部位,在这些部位设置一定的



耗能装置可以有效提高结构的耗能能力。一方面, 摇摆子结构作为一种自身刚度较大, 但底部有限固定的整体型构件, 可以非常有效地抑制如图 10(a)所示的在框架结构中可能发生的局部屈服机制的出现, 使整体结构的破坏模式更加容易控制; 另一方面, 与图 10(b)所示的传统的底部固接的墙体相比, 由于摇摆子结构底部有限固定, 当遭遇强烈地震时, 底部破坏, 释放了由底部巨大弯矩引起的不可避免的墙体本身在根部的破坏, 减小了结构损伤和震后修复的难度。在损伤模式得到有效控制的基础上, 摇摆耗能结构具有两种明确的集中耗能机制, 即摇摆子结构与基础之间即摇摆界面的耗能, 以及摇摆子结构与结构其他部分之间的连接部位的耗能。摇摆子结构与基础之间有限固定, 可以保证在大震下结构不严重侧移, 且当遭遇超大震时, 摇摆子结构与基础之间的连接屈服破坏, 并有一定的耗能能力; 而摇摆子结构与结构其他部分之间的连接变形沿结构高度的分布趋于均匀, 构件数量多, 破坏位置明确, 可采取有效措施提高其耗能能力。

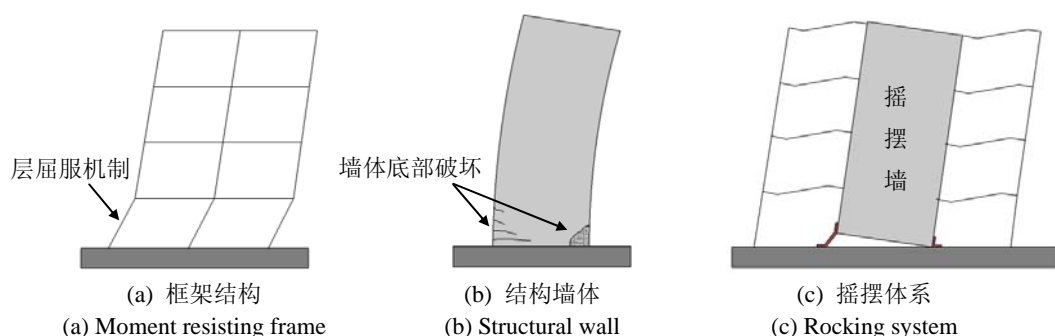


图 10 摇摆耗能体系的构成  
Figure 10 Controlled rocking system

### 3.1 各种摇摆体系

各国研究者在如何利用摇摆耗能结构的这两种集中耗能机制, 减小结构的地震响应方面已经做了一些开创性的工作。Ajrab *et al* (2004)指出了摇摆耗能结构的减震功能, 同时也指出了耗能能力对于该结构体系的重要性。为了尽量提高摇摆体系的耗能能力, 该文提出了如图 11 所示的附加索缆系统。索缆通过撑杆与摇摆墙体在各楼层位置处相连, 并在底部通过串联的阻尼器与基础相连。

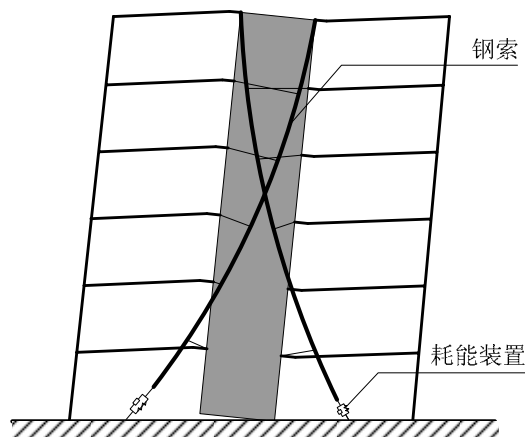


图 11 带有附加索缆的摇摆墙体系 (Ajrab *et al* 2004)  
Figure 11 Rocking wall structure with supplemental tendon systems (Ajrab *et al* 2004)

Midorikawa *et al* (2007)通过在浮动钢柱脚与基础之间设置的耗能翼板, 利用摇摆支撑框架在根部的集中变形来耗散地震能量, 并通过振动台试验研究了这种摇摆耗能体系的减震效果, 如图 12 所示。试验结果显示, 在较小的地震动作用下, 固定柱脚与带有耗能翼板的浮

动柱脚的框架的最大楼层剪力基本相当; 而在比较强烈的地震动作用下, 带有耗能翼板的浮动柱脚可以显著减小下部楼层的剪力, 如图 13 所示。

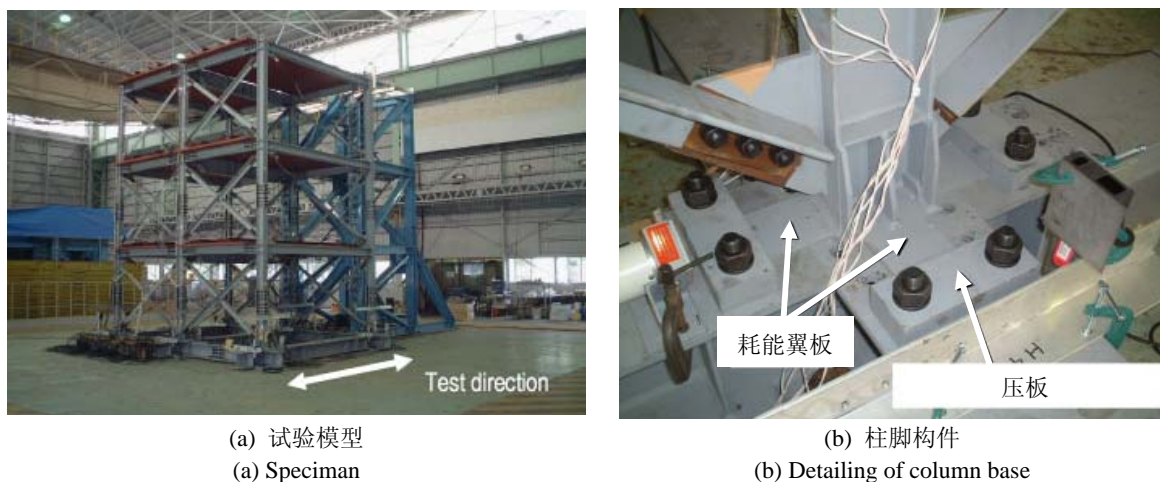


图 12 带有柱脚耗能翼板的摇摆钢支撑框架 (Midorikawa *et al* 2007)  
Figure 12 Braced rocking frame with energy-dissipating wing plates at the column base (Midorikawa *et al* 2007)

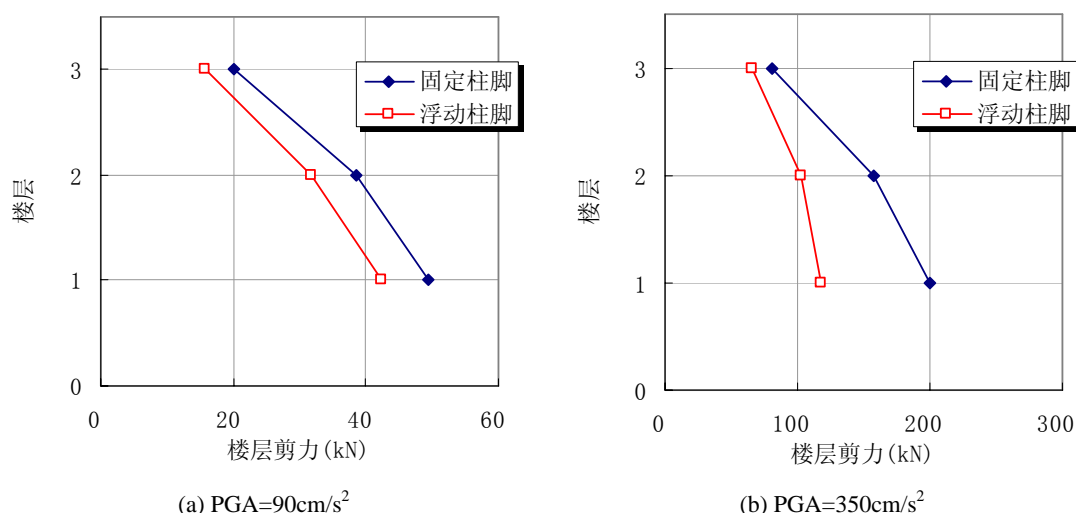


图 13 试验结构的最大楼层剪力 (Midorikawa *et al* 2007)  
Figure 13 Maximum story shear of the specimen (Midorikawa *et al* 2007)

Marriot *et al* (2008) 通过将无粘结预应力技术引入摇摆墙体系, 不但利用摇摆墙及其附属的阻尼耗能装置控制结构的变形模式和最大地震响应, 而且实现了一定的自复位功能。他们设计的自复位摇摆墙如图 14 所示。摇摆系统由预制混凝土墙体、外置钢阻尼器和无粘结预应力筋组成。在强烈地震作用下墙体发生摇摆时, 墙底根部的摇摆界面处的转角使外置钢阻尼器屈服耗能, 地震过后墙体内的无粘结预应力筋提供自复位力, 使墙体恢复到原来的位置。

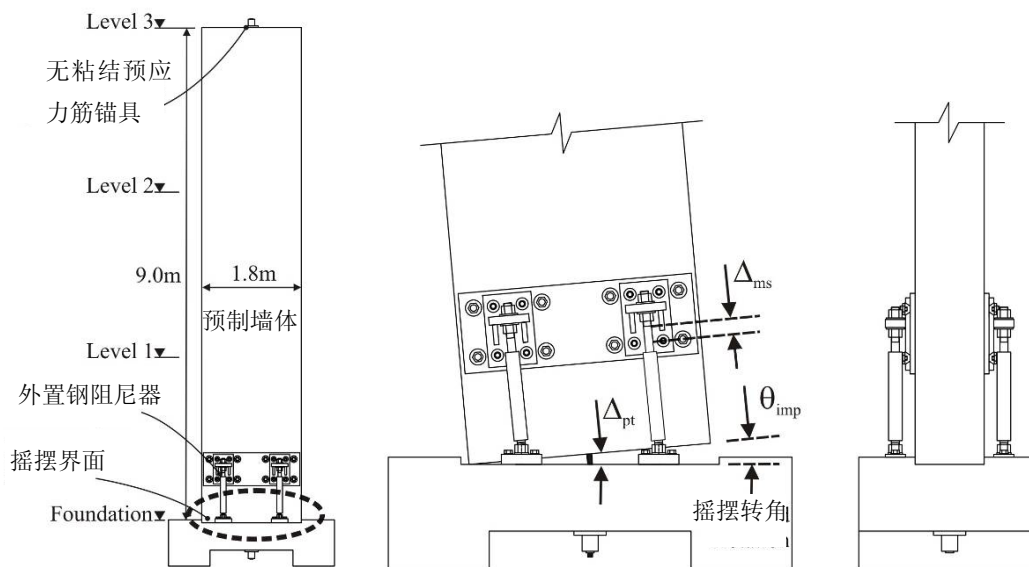


图 14 具有自复位功能的无粘结预应力摇摆墙 (Marriot *et al* 2008)

Figure 14 Self centering rocking wall with unbonded post-tensioned tendons (Marriot *et al* 2008)

Deierlein *et al* (2009)设计了具有类似功能的摇摆钢支撑框架。该摇摆体系由钢支撑框架、竖向的后张预应力筋以及便于更换的耗能元件组成, 如图 15 所示。钢支撑框架和预应力筋在强烈地震下仍预期保持在弹性状态, 仅由耗能元件屈服耗能, 地震过后钢支撑框架可在预应力筋的作用下恢复原位。该模型将于近期在日本 E-Defense 进行足尺模型的振动台试验, 以检验其减震效果。

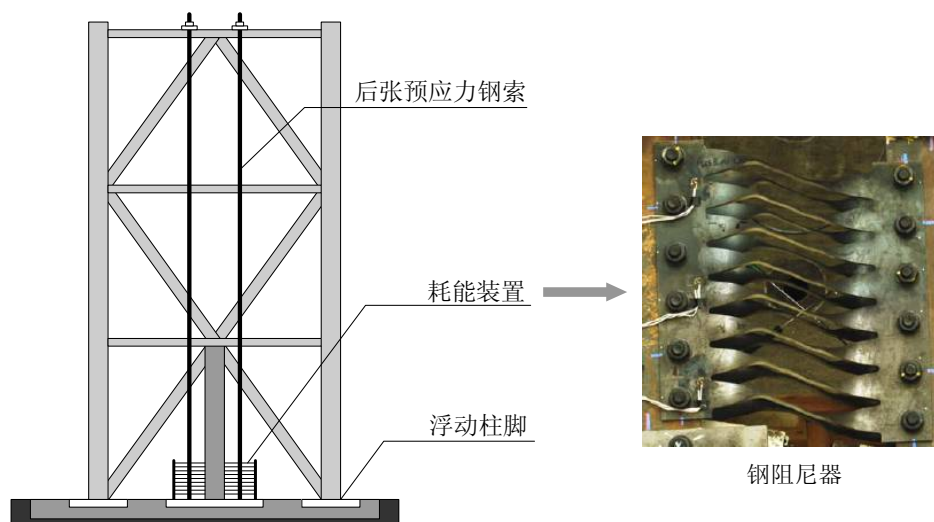


图 15 具有自复位功能的预应力摇摆钢支撑框架体系(Deierlein 2009)

Figure 15 Self centering braced rocking frame (Deierlein 2009)

东京工业大学 G3 教学楼的加固改造设计是运用“破坏-安全”理念的出色案例, 它充分地体现了摇摆耗能结构体系在控制结构损伤模式与提高结构耗能能力两个方面的优越性。G3 楼是东京工业大学综合理工科的综合楼, 建于 1979 年。共 11 层, 屋面高度为 39.70m, 由型钢混凝土框架和钢筋混凝土承重墙组成。1981 年日本的建筑基准法在抗震结构设计方面做了较大的修订。据 2006 年的抗震性能检查, 该楼已不能满足现行抗震设计标准的要求, 尤其是在其长轴方向上。东京工业大学结构工程研究中心的研究人员提出了一种由摇摆墙和钢阻尼器组成的抗震加固方案, 如图 16 所示。该方案是利用现存结构在两端和中央存在的

六个凹槽，附建六片预应力钢筋混凝土摇摆墙体（如图 16c 的结构平面布置），墙体根部通过如图 17 所示的特殊设计的铰连接与基础相连，摇摆墙体与现存钢筋混凝土框架之间通过一系列钢阻尼器相连，如图 16(b)所示。在地震作用下，当结构发生水平变形时，摇摆墙体可以绕其根部的铰连接自由摇摆而不至出现损伤，同时摇摆墙与既存框架结构之间的相对变形将使布置于其间的钢阻尼器充分发挥其耗能能力，减小整个结构的地震响应。

采用一组 19 条地震地面运动记录对加固前后的结构进行弹塑性时程分析，得到的结构最大层间位移角的平均值如图 18 所示。图 18 中同时画出了只增设摇摆墙而不安装钢阻尼器时的减震效果。从中可以清楚的看出，因原结构的变形受到摇摆墙的控制，结构的楼层变形沿高度分布趋于均匀，结构耗能能力有所改善，但提高不多，表现为对于最大变形的降低并不明显。而阻尼器的加入则在保持结构变形模式的同时大大增强了结构的耗能能力，结构的最大变形显著减小。由此可见，摇摆墙的贡献在于创造出相对均匀的变形模式。这是最大限度的利用阻尼器的耗能能力的前提。当变形模式受到控制之后，墙两侧的软钢阻尼器就可以发挥自己的作用，尽可能的耗能地震输入能量，从而减小结构的地震响应。这正是“破坏-安全”抗震设计理念的基本设计概念。

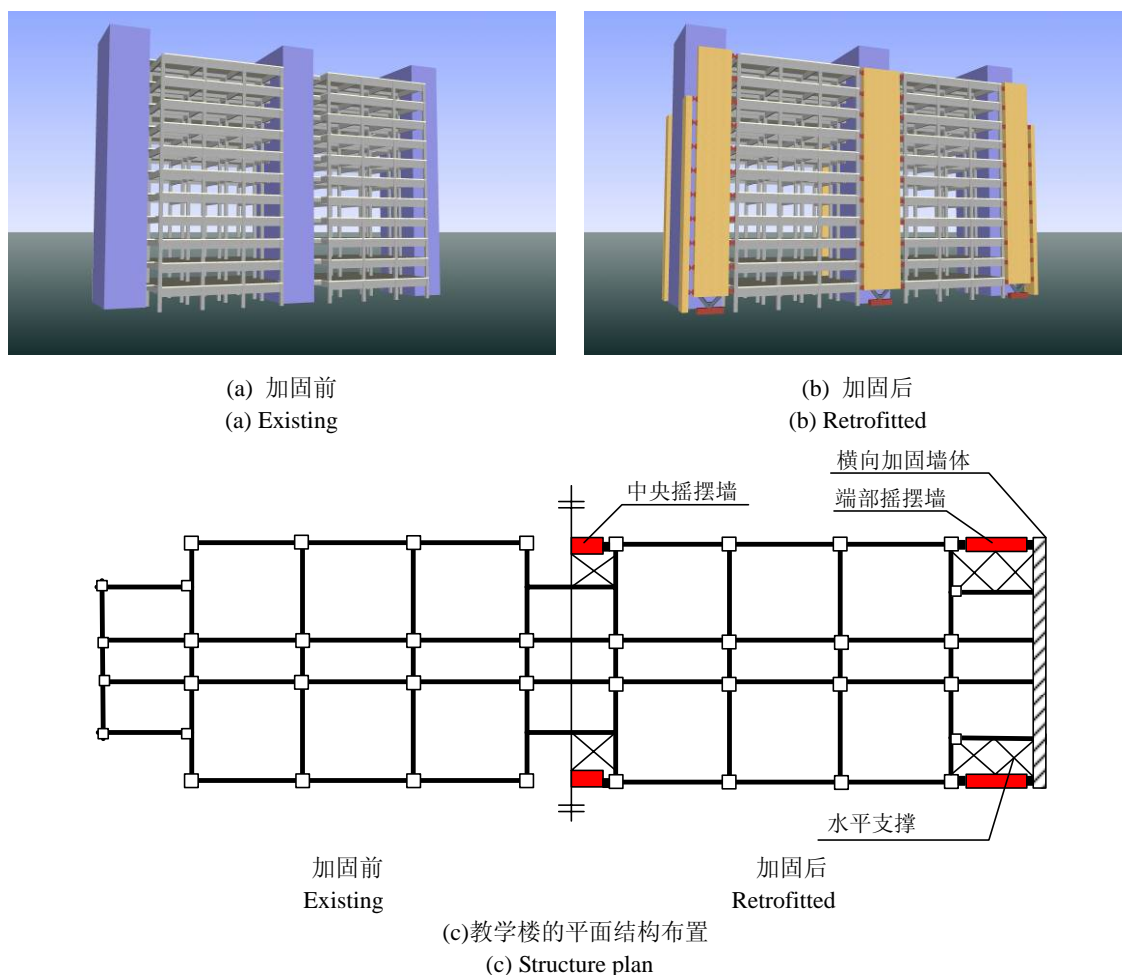


图 16 G3 教学楼在加固前后的结构示意图

Figure 16 Structure layout of G3 Building before and after retrofitting

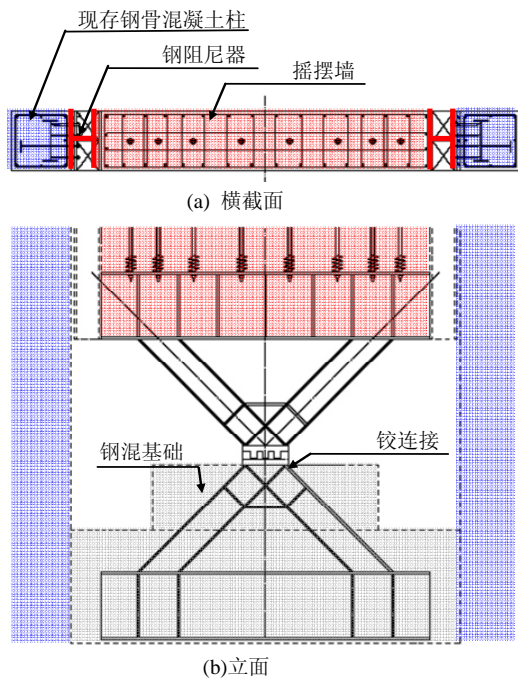


图 17 摇摆墙底部铰接的构造  
Figure 17 Base pin connection of rocking walls

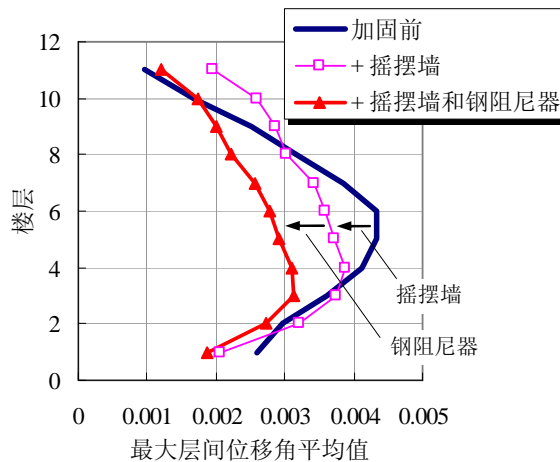


图 18 摇摆墙与钢阻尼器各自的贡献  
Figure 18 Performance improvement by rocking walls and steel dampers

### 3.2 设计原则

摇摆耗能体系中, 摇摆子结构的能力需求取决于结构其余部分的特性。摇摆部分与结构其余部分的响应互相依赖, 在设计中宜进行整体结构的分析。设计中应至少进行以下两步计算。

(1) 小震弹性设计, 以保证正常使用阶段的要求。

(2) 大震非线性设计, 以保证预设损伤模式的实现。在这一步, 需要通过可靠的计算, 确定摇摆子结构的摇摆主体保持弹性所需要的承载力和刚度, 以及结构其余部分保持弹性或仅发生轻微破坏所需要的承载力, 还需要确定摇摆子结构中的耗能部分需要具备的耗能能力。

目前, 进行大震非线性设计还缺乏既能准确把握结构非线性动力响应的主要特征, 又简单易行, 便于大量推广使用的分析方法。动力弹塑性分析计算成本高, 实施难度大, 技巧性强, 不适于在面向普通建筑的抗震设计中推广。基于多自由度等价线性化的反应谱分析 (或等代结构法) 是一种可以方便的预测结构非线性地震峰值响应的方法, 尤其适用于变形模式受到有效控制的结构体系在损伤阶段的计算分析, 值得进一步研究并在实际设计中推广应用。

## 4 结语

“破坏-安全”抗震理念是为适应大量的一般建筑对抗震安全性与经济性的要求而提出的一种抗震设计理念。运用“破坏-安全”抗震理念, 要求工程师超越线弹性分析的局限, 而着眼于对建筑结构在强烈地震下的损伤与破坏模式进行整体把握, 并在此基础上对建筑结构的损伤与破坏模式进行设计。基于“破坏-安全”抗震理念可以在结构体系层次上进行创新, 以保证建筑结构在强震下的安全性。在应用层面上, “破坏-安全”抗震理念主要体现两个基本概念, 一是通过充分可靠的措施和方法控制结构的损伤破坏部位; 二是在此基础上尽量增大结构的耗能能力。在地震工程的研究与实际的工程应用中, 已经有不少体现“破坏-

安全”抗震理念的想法与做法, 其中隔震结构与摇摆耗能结构是比较成功的代表。它们的共同特点是结构的损伤破坏位置明确, 易于控制, 并且具有较高的耗能能力。

本文着眼于汶川地震灾后重建的实际需要, 基于“破坏-安全”抗震理念, 介绍了国内外在这方面已经取得的成果, 希望对研究者和工程师能够基于“破坏-安全”抗震理念进行抗震结构体系创新, 也希望“破坏-安全”这一抗震理念及其相关技术能够在我国广大的经济欠发达地区的抗震设计实践中得到推广, 全面提高我国建筑结构的抗震安全性, 避免汶川地震的悲剧重演。

## 参考文献

- 欧进萍, 邱法维, 1995. 耗能-隔震柔性底层钢管混凝土-钢筋混凝土组合框架的实验研究. 地震工程与工程振动 **15**(2): 29-42.
- 王文明, 1991. 砂层滑动隔震. 王优龙等编. 隔震技术的研究与应用, 北京: 地震出版社: 99-109.
- Ajrab J.J., Pekcan G., Mander J.B., 2004. Rocking wall-frame structures with supplemental tendon systems. *Journal of Structural Engineering* **130**(6): 895-903.
- ASCE 7-05, 2005. Minimum design loads for buildings and other structures.
- TJ 11-78, 1978. 工业与民用建筑抗震设计规范.
- BSL 2004. The Building Standard Law of Japan. Translated by Sansei International Inc. 4th ed. Tokyo: The Building Center of Japan.
- Deierlein G.G., Ma X., Eatherton M. *et al.*, 2009. Collaborative research on development of innovative steel braced frame systems with controlled rocking and replaceable fuses. Proc. 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo: 413-416
- Dooley K.L., Bracci J.M., 2001. Seismic evaluation of column-to-beam strength ratios in reinforced concrete frames. *ACI Structural Journal*, **98**(6): 843-851
- Kabeyazawa T., Matsumori, T. *et al.* Plan of 3-D dynamic collapse tests on three-story reinforced concrete buildings with flexible foundation. (in print)
- Marriott D., Pampanin S., Bull D., Palermo A., 2008. Dynamic testing of precast, post-tensioned rocking wall systems with alternative dissipating solutions. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* **41**(2): 90-103.
- Midorikawa M., Azuhata T., Ishihara T., Wada A., 2007. Shaking table tests on seismic response of steel braced frames with column uplifts. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **35**: 1767-85.
- Paulay T., 1980. Deterministic Design Procedures for Ductile Frames in Seismic Areas. ACI publication **SP-63**: 357-81.
- Paulay T., 1983. Deterministic Seismic Design Procedures for Reinforced Concrete Buildings. *Engineering Structures* **5**(1): 79-86.
- Paulay T., Priestley M.J.N., 1992 *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. New York: John Wiley & Sons, Inc.