

文章编号: 1000-5013(2009)01-0006-06

# 损伤结构弹塑性抗震性能分析及评价

王全凤, 黄庆丰

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 综述结构弹塑性动力响应分析的方法、理论模型, 以及地震作用下钢筋混凝土结构破坏准则. 在分析结构弹塑性动力分析及其评价存在问题的基础上, 提出其动力分析及评价关键技术. 根据结构滞回运动中损伤退化累积释放弹性能与累积塑性变形能的关系, 导出累积释放弹性能-位移关系函数. 介绍以累积释放弹性能指标建立结构损伤程度评价模型、结构延性评价模型及相应的结构破坏准则新思路, 并应用于解决结构基础隔震、减振耗能、振动控制和与非线性振动有关的工程问题.

**关键词:** 损伤结构; 弹塑性振动; 累积释放弹性能; 性能分析; 时程分析

**中图分类号:** TU 352.201

**文献标识码:** A

大地震作用下的建筑结构往往处于弹塑性工作状态, 结构物的局部构件在滞回运动中损伤退化, 部分振动能量以声、热等形式向系统外释放. 结构刚度、强度退化及对外释放能量, 使结构系统的振动能量迅速重分布, 形成时变参数动力系统. 现有常用的结构动力响应时程分析技术解决这类问题很困难, 或分析结果与实际偏差较大, 工程抗震普遍采用概念设计或结构模型振动台试验, 分析结构弹塑性抗震性能. 工程抗震的另一个重要问题是, 如何评价结构遭遇地震时的损伤程度、定义结构破坏、评价已损伤结构抵御余震作用的能力. 目前, 普遍接受结构破坏符合“结构双重破坏准则”, 以及采用以“累积耗能”为指标的“结构损伤模型”<sup>[1-2]</sup>, 在时程分析中评价或基于可靠度方法导出破坏指数评价. “累积耗能”包括结构滞回运动过程中的累积塑性变形能和累积释放弹性能两部分, 实际应用时, 一般用累积塑性变形能表示累积耗能. 对钢筋混凝土结构, 容许“累积耗能”极限受结构组成和构件构造影响很大, 指标的可靠度分析显得十分重要和复杂. 结构抗震理论和实践在近几十年取得很大进展, 但也存在一些悬而未决的问题. 结构弹塑性时程分析方法和结构性能评价, 一直是抗震研究的重要内容. 本文以钢筋混凝土结构为对象, 综述抗震结构弹塑性振动中因损伤退化对外释放弹性能激励效应分析方法.

## 1 国内外研究现状

### 1.1 结构弹塑性动力响应分析

结构动力反应分析是地震工程学的主要研究内容, 而结构动力反应分析最后可归结为动力方程的求解. 一般结构系统的动力方程解析法求解十分困难, 而数值方法在工程中有广泛的应用.

**1.1.1 简化方法** 20 世纪的 50 年代末至 80 年代, 人们提出了许多地震作用下结构弹塑性位移的简化计算方法, 如等代能量法、替代结构法<sup>[3]</sup>、加藤能量法、弹塑性位移谱<sup>[4,5]</sup>、塑性内力重分布法等. 其中, 简化的能量方法一直得到发展和应用<sup>[6,7]</sup>, 并可以简化地考虑结构局部屈服卸载, 对结构弹塑性抗震性能分析起了很大作用. 至今, 塑性内力重分布法仍然是我国建筑抗震设计规范(《GB 50011-2001 建筑抗震设计规范》)的推荐方法.

**1.1.2 动力方程的时程分析方法** 时程分析是结构动力学研究的基本问题, 研究成果较多, 大致可分为差分型和积分型两类. 常用的差分型方法有: 平均加速度法、Houbolt 法、Newmark 法、Wilson  $\theta$  法、

收稿日期: 2008-03-11

作者简介: 王全凤(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土木工程的研究. E-mail: qfwang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578066)

中心差分法等。其中,当  $\theta \geq 1.37$  时, Wilson  $\theta$  法是无条件稳定算法<sup>[8]</sup>。

积分型算法如国内学者钟万勰基于  $2^N$  类算法提出的精细积分法<sup>[9]</sup>,取得了很高的计算精度,目前已经开始应用于求解非线性动力问题<sup>[10]</sup>。类似的还有积分型直接积分法<sup>[11]</sup>、样条函数法<sup>[12]</sup>等。

一般认为,结构弹塑性时程分析可以较好地计算结构的弹塑性响应。对一般的非线性结构系统,动力方程中含有非线性项,常将非线性阻尼项作为荷载项处理。此时,需先计算出离散时刻的结构位移、速度和加速度,然后在下一时间段施加前一时间段的非线性作用。对于非线性静力问题,通常采用迭代法解决系统的非线性刚度和系统变形的相互影响。对建筑结构的弹塑性动力响应时程分析,采用迭代法处理类似问题将面临极大困难,往往期望离散时刻的系统重新平衡能减少部分误差。复杂非线性动力系统的数值求解,对众多工程领域都有关键性、重要性和迫切需要。

1.1.3 模态分析法<sup>[13]</sup> 模态分析内容涉及模态理论、动态测试技术、参数估计 3 个方面。近几年,模态分析由传统线性位移实模态、复模态理论发展到广义模态,并进一步被引入到非线性结构振动分析领域。在土木工程结构测试、结构振动控制、结构弹塑性分析等方面的应用也逐渐增多。模态分析的优点是有清晰的物理意义和过程。存在问题,分析结果与模态的取值精度有关,结构进入弹塑性振动后高阶模态影响较大,但计算时容易忽略。此外,结构振动的线性模态是固定的,而非线性模态则是运动变化的,传统模态理论引伸拓展到分析非线性振动面临许多问题,目前仍处在发展阶段。

1.1.4 Push-Over 法 它是一种静力非线性分析法,最早由 Freeman 等提出,也称为静力弹塑性方法。1975 年, Freeman 等<sup>[14]</sup>在 Push-Over 法中引入了地震需求谱曲线和能力谱曲线的概念,并促进了其在结构抗震性能评估等方面的应用推广。Push-Over 法本质上是一种与反应谱相结合的静力弹塑性分析法。它按照一定的水平加载方式,对结构施加单调递增荷载,直到将结构推至一个给定的目标位移或结构呈现不稳定状态为止,用于分析结构进入非线性状态时的反应,从而判断结构及其构件的变形和受力是否满足设计要求。Push-Over 法的优点是,可以根据结构变形状态确定出结构的薄弱位置,从而采取相应措施提高结构的抗震性能。而其存在的问题是,难以考虑结构运动状态及运动状态变化影响,分析过程不能完全模拟结构的实际振动过程。

在国内,关于 Push-Over 法的研究起步较晚,直到 20 世纪 90 年代才从国外传入,但随着它的引进已逐渐引起人们的关注并不断被推广和应用。由于在 Push-Over 法中水平加载方式的确定对计算结果的精度影响很大,因此关于理想水平加载方式的探索也不断出现。常见的横向水平力分布形式为均匀分布、倒三角形分布、反应谱振型组合得到对应于第一振型的水平力分布等形式。杨溥等<sup>[15]</sup>对该 3 种水平加载模式进行分析对比,并与动力分析的结果相对照。结果发现,第 3 种加载模式比较理想,为今后的研究和应用提供了参考依据。在 Push-Over 分析法基础上,发展起来一种介于结构弹塑性动力分析和弹性动力分析之间的结构抗震性能评估法——能力谱法。叶献国等<sup>[16]</sup>对能力谱法进行了改进,与动力时程分析法相比,它不仅计算简便、概念直观,而且还能得到结构在任意给定地震作用下的弹塑性反应,是一种简便、实用的建筑物抗震性能评估方法。20 世纪 90 年代,美国地震工作者提出了基于性能(Performance Based)和基于位移(Displacement Based)的设计思想后,静力弹塑性分析方法受到广泛重视。许多国家将它列入抗震规范用来分析结构弹塑性抗震性能,我国也将 Push-Over 法引入《GB 50011-2001 建筑抗震设计规范》中。

1.1.5 卸载分析思想 要使结构在强烈地震作用下保持弹性是不现实的。一般情况下,结构将进入弹塑性状态而出现动力卸载效应,结构能否抵御屈服卸载效应的破坏作用,很大程度上与本身的弹塑性振动特性有关,包括结构刚度随时间变化这一参数激励影响。此外,也涉及外部地震激励、结构延性和地震激励持续时间等因素。卸载分析不通过谋求进一步精进计算模型或解法来减少结果误差,而通过寻找时间步长内结构系统的计算状态与实际的偏移量,并用补充能量方程或动量方程描述出来。经过修正计算后抵消“计算扰动量”效应,从而减少结果误差和提高计算的可靠和稳定性<sup>[17]</sup>。由于是基于相对简单计算模型和解法来处理较复杂的非线性问题,分析过程简便和灵活,某种意义上是对结构稳定性基本概念在计算分析领域的进一步推广应用,有较好的理论价值和应用前景。

屈服卸载效应也是结构抗倒塌分析必须考虑的问题。文[12, 18]采用卸载分析思想协调运动约束条件(计算假设加速度线性变化)和平衡方程,很大程度提高了 Wilson  $\theta$  时程分析法的计算精度和计算稳

定性.

1.1.6 计算机仿真试验 强烈地震作用下, 结构经过弹塑性工作阶段进入到破坏阶段, 部分构件失效退出工作, 结构震动能量重新分布, 但整体结构并没有倒塌. 随着破坏过程的继续, 更多的构件先后失效导致结构局部坍塌, 整体结构因失稳而倒塌. 进行结构地震破坏原型试验几乎是不可能的, 计算机仿真模拟试验具有可行性和现实意义. 1984 年, 武藤清采用考虑节点域纯剪切框架分析方法, 对一幢高层建筑作了动力仿真分析, 取得了突破性成果; 李康宁等<sup>[19]</sup>采用 Multi-Spring 模型模拟强振作用下的地震反应, 可以模拟严重破坏但不倒塌的结构性能. 叶献国<sup>[20]</sup>建立了构件破坏单元, 实现了钢筋混凝土框架结构破坏全过程模拟. 结构计算机动力仿真试验有重要工程意义, 是结构抗震研究的一个重要方向, 近几年逐渐被推广应用的 Push-Over 法实际上也可认为是一种计算机仿真试验方法.

## 1.2 结构弹塑性动力响应分析的理论模型

1.2.1 整体结构动力分析模型 建筑结构在地震作用下的动力分析, 一般可以简化为多质点体系. 常用的计算模型有层间模型、杆系模型、组合单元模型等. 层间模型又分层间剪切模型和层弯剪模型, 其最大贡献是引出了结构薄弱层的概念, 在研究结构动力响应的宏观规律方面有明显的优势. 杆系模型可以从构件层次研究和了解结构动力状态变化. 有些构件(如剪力墙)简化成杆单元显然不合理, 目前, 国内外将较复杂的高层建筑结构离散为墙单元、板单元及杆单元的组合单元结构, 采用有限元求解<sup>[12]</sup>.

1.2.2 单元分析模型 结构单元力学模型模拟有两个难点: (1) 构件截面非弹性刚度在受力过程中改变; (2) 构件的刚度分布与内力分布一致. 用于计算机模拟结构滞回性能的单元模型, 大致有集中塑性模型和分布塑性模型两类. 集中塑性模型如多分量 Clough 模型、单分量 Gibson 模型等, 之后, 许多学者做了改进和发展. 1999 年, Ambrisi 等提出多分量模型, 考虑了恒定轴力对弯矩和剪力影响. 分布塑性模型有分段变刚度模型、曲线分布刚度模型、有限单元模型等, 克服了集中塑性模型的一些缺点, 可以考虑材料非线性、几何非线性、混凝土裂面效应、钢筋滑移等众多影响因素.

1.2.3 恢复力模型 一般地, 恢复力模型是以拟采用的单元分析模型为目标, 根据大量构件或结构试验数据总结归纳提出的. 恢复力模型也是一个广义概念, 既可以用于层间模型描述层位移-剪力关系, 也可用于杆系模型描述杆端转角-杆端弯矩关系, 或用于分量模型描述分量的本构关系. 常用的恢复力模型有理想弹塑性模型、Clough 双线型、Takeda, Aoyama, Muto, Roufaei 等三线型和 Nakata 曲线形. 1985 年, Park 等提出的结构损伤模型, 进一步应用了地震作用下结构构件低周疲劳损伤的一些结论. 出于空间分析多方向地震作用加载的需要, 上述模型进一步拓展到多轴加载条件, Pecknold, Aoyama, 以及我国的杜宏彪等分别开展过这方面工作. 此外, 也采用一种被称为纤维模型的分析模型. 在此基础上又发展了多弹簧模型, 现已成功应用到结构三维动力分析.

1.2.4 地震作用下钢筋混凝土结构破坏准则 评价地震作用下的结构损伤程度, 是结构抗震研究的一个重要问题. 目前的普遍看法是, 结构或构件抵抗最大地震响应能力和结构累积损伤破坏界限将互相影响, 随着累积损伤增加, 最大响应破坏控制界限不断地降低. 同样, 随着最大响应增加, 累积损伤破坏控制界限也不断地下降. 上述两种结构或构件的破坏类型, 以及评价它们之间相互影响关系的方法, 构成了抗震结构双重破坏准则的内容. 结构双重破坏准则由 Banon 等<sup>[11]</sup>首先提出, 并将结构损伤程度表示为最大变形和累积耗能的函数. 根据这一准则, Park 等<sup>[2]</sup>建立了最大变形和累积损伤线性组合的结构损伤模型. 其他常用的有最大反应破坏准则、延性破坏准则和能量破坏准则等. 国内对此也有大量研究, 王光远等提出了模糊破坏准则, 而欧进萍等<sup>[21]</sup>根据结构损伤模型, 分析了余震作用下的结构抗震性能.

## 1.3 结构弹塑性

1.3.1 结构弹塑性动力分析 目前, 在进行弹塑性结构动力响应时程分析时, 一般不考虑结构损伤退化对外释放弹性能影响效应, 而如何计算这部分影响效应是个问题. 非线性动力方程时程积分一般性方法的计算量很大, 计算技术处理十分复杂, 缺乏直接技术积累支持, 用于分析大型结构在近一段时间内不太现实. 若采用基于结构的切线刚度动力平衡, 用 Wilson- $\theta$  等积分法进行时程分析, 计算中不能控制误差且容易导致结果发散而中止计算. 究其原因, 并非如 Wilson- $\theta$  法有问题或时间步长没有足够小, 而是基于切线刚度动力平衡分析仍含有以静拟动的成分, 难于直接分析系统内的参数激励效应, 计算运动状态与动力平衡方程存在不协调. Wilson- $\theta$  等方法也可采用在每一时间步长内平衡迭代收敛解决上述

问题, 但又回到一般性方法.

动力仿真分析的优点是容易实行, 面临的问题是如何使仿真尽可能符合动力系统的实际运动过程. 如基于性能分析, 容易得到同一标准下的分析比较结果. Push Over 法的问题是以静拟动的过程, 必然丢失一部分频率分量的影响. 弹塑性动力系统的运动频率是变化的, 各阶频率振动能量相互交换, Push Over 法很难反映整体结构的弹塑性动力性能. 损伤结构弹塑性动力系统的对外释放弹性能影响仍是个未知量, 其时间过程中的累积效应有可能很大, 对损伤结构弹塑性抗震性能可能有重要影响.

1.3.2 抗震性能评价 目前, 普遍采用累积耗能指标评价, 由结构双重破坏准则评价结构破坏, 操作时又大多直接用“累积塑性变形能”表示“累积耗能”. 由于建筑结构常采用钢-混凝土材料构件, 不同的结构组成、不同构件和不同构件构造都对“累积塑性变形能”极限有很大影响. 评价指标的离散性很大, 取值只能凭主观作出判断. 模糊破坏准则从理论上一定程度解决了这一问题, 但其参数如何取值及如何将模糊评价与结构的动力性能分析相结合, 仍然需要在工程研究和实践中不断加以探索和总结.

在试验研究与理论分析中, 采用滞回耗能来评价结构整体或构件的弹塑性动力性能是目前最常用的方法. 然而, 滞回耗能评价方法存在着如下 3 个缺陷. (1) 滞回运动中, 结构或构件的损伤过程伴随着能量的释放, 滞回耗能不能全面地考虑到这一方面. (2) 滞回耗能是根据滞回曲线确定, 而滞变恢复力模型已考虑了损伤了影响. 因此, 往往造成一定程度的重复计算而显得结果不准确. (3) 滞回耗能不能考虑恢复力模型中的下降段, 不能应用于破坏阶段的分析.

国外主要 3 个典型地震损伤评价模型. (1) Park 模型. 根据一大批美国和日本的钢筋混凝土柱试验结果, 美国学者 Park 等<sup>[21]</sup>在 1985 年首次提出以最大变形与累积滞回耗能相组合的双参数地震损伤模型. (2) 基于延性的模型. 由于 Park 模型存在着循环荷载影响系数取值无根据, 以及结构或构件在极限状态下的损伤参数大于 1 等缺陷. Ghobarah 提出基于两次 Push Over 分析得到的刚度比, 来定义损伤指数并进行地震损伤评价<sup>[22]</sup>. (3) 基于能量形式的损伤指数评价模型.

由于结构的累积损伤破坏是一个过程, 结构在地震动下的反应具有随机性. 在实际地震中很难记录到每一个建筑结构的时程数据, 一般只可能得到结构的初始状态和稳定后的状态. 因此, 影响结构破坏的累积效应和最大反应较难估计, 也为估计最大反应和累积效应引起的损伤带来困难. 如果把过程当作一个黑箱, 通过结构的初始刚度和退化刚度来估计结构的等效最大位移, 从而可以认为结构只进行一次循环, 用一次循环来等效累积效应. 这次循环的滞回耗能等效于结构的多次循环的滞回耗能. 这样可以避开由于结构受动力荷载作用而引起的复杂的滞回过程, 把过程量转化为状态量, 使结构的破坏指数能更方便的运用于实际<sup>[23]</sup>.

## 2 损伤结构振动评价关键技术

### 2.1 对外释放弹性能激励效应分析方法

根据卸载分析方法<sup>[24]</sup>和损伤结构滞回运动中累积释放弹性能-位移关系, 在时间步长内建立相应的补充能量方程描述对外释放弹性能激励效应, 推导加速度增量计算公式, 并嵌入到结构弹塑性动力响应时程分析过程中.

### 2.2 释放量-位移函数

根据已有的柱构件滞回运动中刚度及强度退化的试验和理论研究成果, 从力学上分析柱构件刚度及强度退化与对外释放弹性能关系, 初步导出柱构件滞回运动中累积释放弹性能-位移关系函数. (1) 柱构件单向加载破坏试验. 考察柱单向加载破坏的弹性能释放过程, 确定柱单向加载情况下的累积释放弹性能-位移关系及破坏界限. (2) 柱构件反复加载破坏试验. 考察柱反复加载破坏的弹性能释放过程, 确定柱反复加载情况下的累积释放弹性能-位移关系及破坏界限.

### 2.3 结构损伤和延性评价

确定构件在单向加载和反复加载情况下的破坏界限(用对外弹性变形量释放量表示), 以及两种破坏形式的破坏界限之间的关系. 建立以“累积释放弹性能”为指标的结构损伤模型、延性评价模型及相应的损伤结构或构件破坏准则, 来描述结构破坏过程. 比较“累积释放弹性能”指标和“累积耗能”指标评价模型, 分析它们之间存在的联系.

2.4 时程分析过程

(1) 综合考虑系统对外释放振动能量影响, 以及协调计算运动约束条件( 计算假定) 和动力平衡方程, 编写损伤结构弹塑性时程分析程序, 提高分析的稳定性和可靠性, 考察损伤结构弹塑性系统的动力性能。(2) 时程分析过程中, 考察评价结构损伤程度、结构延性及其他抗震性能。(3) 考察地震作用的持时影响。

3 研究进展

由于混凝土破坏导致构件破坏, 构件损伤退化程度同“ 累积释放弹性能” 指标的相关性应当比同“ 累积耗能” 指标的相关性好很多. 采用“ 累积释放弹性能” 指标, 对简化结构损伤评价方法、评价的可靠度和实用性可以起很好的作用. 损伤结构或构件滞回运动过程中, 累积塑性变形能力越好, 其对外释放弹性能的速度也越慢, 过程越长. “ 累积释放弹性能” 同结构或构件的强度、刚度退化程度有关, 可以从结构或构件积蓄弹性能的能力反映出来. 根据已有的结构或构件滞回运动的损伤退化模型( 恢复力模型), 理论上可以寻求由力学方法导出结构或构件滞回运动的累积释放弹性能 位移关系函数.

构件试验中, 因损伤退化对外释放能量将产生加速度激励, 使得恢复力曲线有一定程度波动, 可以通过测量力波动量做功得到弹性能释放量, 并与理论结果相比较. 文[ 25] 根据 4 个 HRB400 级钢筋混凝土柱低周反复加载破坏性试验数据, 采用基于能量形式的损伤指数评价模型评价柱的破坏状况, 并与 Park 模型和基于延性的模型比较, 如表 1 所示. 从表 1 可以看出, 依据 Park 模型计算出来的损伤指数均大于 1, 按照评价准则, 可以认为 4 个试件已经倒塌, 这与本次破坏性试验的结果不是很相符, 但其计算的结果是偏安全的. 基于位移延性模型计算出来的损伤指数均大等于 0.3, 按照评价准则, 认为 4 个构件处于严重破坏( 不可修复) 的状态, 这与试验的结果符合较好, 但是损伤指数值很边缘化. 按照本文提出的模型计算得到的损伤指数, 4 个试件都处于严重破坏( 不可修复) 的阶段, 这与试验的结果非常符合.

表 1 构件在不同损伤模型下的损伤指数

Tab.1 Damaged indexes of four columns by using different damaged models

损伤模型	KZ-1	KZ-2	KZ-3	KZ-4
Park 模型	1.02	1.02	1.01	1.01
基于延性模型	0.31	0.31	0.30	0.31
本文模型	0.69	0.69	0.70	0.69

本文提出的损伤结构弹塑性动力性能和抗震性能分析评价新思路, 可用于满足结构抗震设计及研究需要, 也可进一步发展应用于分析解决结构减振耗能、振动控制和基础隔震等问题<sup>[26]</sup>. 这为抗震结构的设计、加固和性能研究, 提出了新理论和新方法奠定基础. 结构损伤退化对外释放弹性能激励效应分析方法, 可进一步发展应用于控制系统的动力响应分析, 对一些工程领域中的非线性动力方程数值求解方法的研究, 提供了有价值的参考.

参考文献:

[ 1] BANON H, IRVING H M, BIGGS J M. Seismic damage in reinforced concrete frames[ J]. ASCE J Struct Eng, 1981, 107(9): 1713-1729.

[ 2] PARK Y K, ANG A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete[ J]. ASCE J Struct Eng, 1985, 111(4): 722-739.

[ 3] HOUSNER G W. Behavior of structures during earthquakes[ J]. J Eng Mech, 1959, 85(4): 109-129.

[ 4] JUWHAN K, KEVIN R, COLLINS A M. Closer look at the drift demand spectrum[ J]. ASCE J Struct Eng, 2002, 128(6): 942-945.

[ 5] 韦承基. 弹塑性结构的位移比谱[ J]. 建筑结构学报, 1983( 1): 40-48.

[ 6] LEELATAVIWAT S, SUBHASH C G, BOZIDAR S. Energy based seismic design of structures using yield mechanism and target drift[ J]. ASCE J Struct Eng, 2002, 128( 8): 1046-1054.

[ 7] 周云, 徐彤, 周福霖. 抗震和减振结构的能量分析方法研究与应用[ J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(4): 133-139.

[ 8] 黄庆丰, 王全凤, 胡云昌. Wilson $\theta$  法时程积分的运动约束和计算扰动[ J]. 计算力学学报, 2005, 22(4): 477-481.

[ 9] 钟万勰. 暂态历程的精细计算方法[ J]. 计算结构力学及其应, 1995, 12(1): 1-6.

- [10] 顾元宪,陈隄松,张洪武. 结构动力方程的增维精细积分法[J]. 力学学报, 2000, 32(4): 447-456.
- [11] 吕和祥,于洪洁,裘春航. 动力学方程的积分型直接积分法[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(2): 151-156.
- [12] 秦荣. 计算结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 284-306.
- [13] 陆秋海,李德保. 模态理论的进展[J]. 力学进展, 1996, 26(4): 464-472.
- [14] FREEMAN S A, NICOLETTI J P, TREH J V, et al. Evaluation of existing buildings for seismic risk: A case study of puget sound naval shipyard[C] // Proc First U. S. National Conf on Earthquake Eng Berkley. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 1975: 113-122.
- [15] 杨溥,李东,李英民,等. 抗震结构静力弹塑性分析(Push Over)方法的研究进展[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(S1): 87-92.
- [16] 叶献国,种迅,李康宁,等. Push Over方法与循环往复加载分析的研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2001, 24(6): 1019-1024.
- [17] 黄庆丰,王全凤,胡云昌. 主动变刚度结构的动力卸载效应[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 157-162.
- [18] 黄庆丰,王全凤,胡云昌. 时程积分过程中结构运动参数的协调[J]. 固体力学学报, 2004, 25(1): 7-10.
- [19] 李康宁, KUBO T, VENTURA C E. 建筑结构三维分析模型及其用于结构地震反应分析的可靠性[J]. 建筑结构, 2000, 6: 14-18.
- [20] 叶献国. 基于非线性分析的钢筋混凝土结构地震反应与破损的数值模拟[J]. 土木工程学报, 1998, 31(4): 3-13.
- [21] 欧进萍,吴波. 弹塑性随机振动系统中恢复力数学模型的若干形式[J]. 应用力学学报, 1995, 12(1): 63-71.
- [22] GHOBARAH A, ABOU-ELFATH H, BIDDAR A. Response based damage assessment of structures[J]. J Earthquake Engng Struct Dyn, 1999, 28: 79-104.
- [23] 丁建. 钢筋混凝土框架直接基于损伤性能的能力设计理论及方法的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [24] 黄庆丰,王全凤. 弹塑性结构动力系统的时变刚度激励效应分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(12): 16-22, 32.
- [25] 刘良林,王全凤,沈章春. HRB400级钢筋混凝土柱的滞回性能研究[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 280-283.
- [26] 国家自然科学基金委员会. 力学——自然科学学科发展战略调研报告(续)[J]. 力学与实践, 1998, 20(2): 61-72.

## Elasto-Plastic Performance of Damaged Structures and Its Evaluation

WANG Quan-feng, HUANG Qing-feng

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The elasto plastic dynamic analysis methods, theoretical models of structures and failure criterion of reinforced concrete structures under earthquake are reviewed. Based on some problems of elasto plastic dynamic analysis of structures and evaluation of damaged structures, the key techniques of elasto plastic dynamic analysis and its evaluation are presented. According to the relationship between the cumulative emission of elastic energy during damage degradation and the cumulative plastic energy in the hysteretic motion, the function between cumulative emission of elastic and plastic energy is obtained. Taking the cumulative emission of elastic energy as an evaluative index, a new idea to establish the model of structural damage and to evaluate the ductility and failure criterion, is put forward, which can be applied to solve the problems concerning non linear vibration, such as the base isolation, vibration absorption and energy dissipation, vibration control.

**Keywords:** damaged structures; elasto plastic vibration; cumulative emission of elastic energy; perform evaluation; time history analysis

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)