

文章编号:1673-2049(2008)02-0015-09

易损性分析在结构抗震及健康监测中的应用

姜绍飞^{1,2}, 杨 博², 党永勤³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350002; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 沈阳建筑大学 建筑设计研究院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:为了有效地对日见增多的大型复杂结构进行日常管理和减少各种灾害的损失,从结构易损性的概念、基本原理入手,分析总结了易损性分析在结构抗震、桥梁抗震设计中的计算方法及其应用进展,并对各种方法的优劣进行了评述;对易损性分析在结构健康监测系统开发及传感器优化布置中应用的可行性进行了详细论述,并对其近期发展和应用情况进行了介绍;最后对易损性分析的发展前景进行了展望。

关键词:结构健康监测;易损性分析;传感器优化布置;抗震设计

中图分类号:TU317 **文献标志码:**A

Application of Vulnerability Analysis in Structural Seism and Health Monitoring

JIANG Shao-fei^{1,2}, YANG Bo², DANG Yong-qin³

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;
3. Institute of Building Design, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: In order to effectively manage large-scale and complex structures and reduce damage extents by various disasters, authors firstly introduced the concept and basic principles of structural vulnerability. Then it was reviewed to the calculation methods and its application of structural vulnerability analysis to structural and bridge seismic designs, and the benefits and disadvantages of various methods were overviewed. The feasibility and application of structural vulnerability analysis to structural health monitoring system development and sensor optimal arrangement were discussed in details, and the development in the near future and application were introduced. Finally, the perspective of vulnerability analysis was forecasted in the future.

Key words: structural health monitoring; vulnerability analysis; optimal arrangement of sensor; seismic design

0 引言

近些年来,由于结构材料性能的退化或灾害等原因,世界各地频繁发生房屋倒塌、大桥折断等工程

事故,造成了重大的人员伤亡和经济损失。如何在灾难到来之前对结构的健康状况进行监测与灾难预警成为各国研究的热点,为此许多大型结构安装了长期健康监测系统,对其进行健康状况监测、检查与

收稿日期:2008-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50408033);福建省青年科技人才创新项目(2007F3054);

福建省教育厅科技项目 A 类重点项目(JA07002)

作者简介:姜绍飞(1969-),男,山东青岛人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:cejsf@fzu.edu.cn。

检测^[1]。结构健康监测系统的开发和结构构件易损部位的判断、检测逐渐成为各国研究的热点和难点。

此外,工程事故的频繁发生使越来越多的专家认识到,保证结构的安全,除了要在实际过程中考虑结构(构件)的安全储备、结构设计与施工的安全质量控制之外,还必须考虑结构的易损性或鲁棒性问题^[2]:如果一个结构在某种局部破坏作用下所产生的后果是整个结构大比例的破坏,则称该结构是易损的;反之,如果一个结构在一定程度上能够承受任意的局部破坏作用,则称该结构是不易损的、鲁棒的。结构的局部破坏引起的整体破坏范围越大,结构的易损性就越大。在特定的荷载作用下,单个构件的失效可能导致整个结构体系的破坏。造成这种破坏有很多路径,每条路径的能量需求也不同,将结构体系失效作为破坏的后果,需要能量最小的路径就是最易损路径,在此路径上布置传感器,显得更加简便、易于掌握^[3-5]。因此,本文中笔者从易损性的概念及基本原理入手,将其在结构抗震、桥梁抗震方面的研究进展进行了总结,并就其在结构健康监测中应用的可行性、研究现状进行了论述,对其发展前景进行了展望。

1 结构易损性分析

1.1 基本概念

易损性的概念最早出现在军事领域用于描述飞机或船体对于物理碰撞的脆弱程度。最近十几年,它被推广用于人类和社会学系统、生物和生态系统、数据库和计算机系统、金融系统以及复杂的工业生产系统。过去,人们对工程结构的易损性不是完全没有认识:各国的工程实践中,凭借总工程师的经验对结构在易损性或鲁棒性方面进行检查、把关。1968 年 Ronan Point 公寓垮塌事件发生后,一些学者开展了避免结构连续倒塌设计方法的初步研究,但对于易损性的概念,各国学者有不同的认识。

Lind^[6]提出基于概率的易损性和容许损伤的定义,定义易损性为损伤系统失效概率与未损伤系统失效概率的比值,而容许损伤则被定义为易损性的倒数。Ziha^[7]通过引入不确定测度的概念,提出基于不确定性信息熵的事件系统鲁棒性理论,指出提高系统鲁棒性要求的有效模式和失效模式的概率分布尽量一致均匀。Beeby^[8]提出基于能量吸收思路的单位体积容许损伤能量的概念,并通过规定构件所需要的单位体积的极限容许损伤能量,从而保证结构能够吸收由意外荷载产生的损伤能量,满足对

鲁棒性的要求。Lu 等^[9]提出基于结构形式的易损性概念,通过研究结构构件组合的方式和结构可能发生的失效情况,分析结构中的薄弱部位。

于刚将结构易损性定义为结构的局部损伤与由于局部损伤而造成的结构整体破坏后果的比,是一个与鲁棒性相对的概念。吕大刚定义结构(地震)易损性为因发生地震而导致损伤或损伤的可能性,它可以针对一个或一类结构,也可以针对一个地区^[10]。广义上讲,结构(地震)易损性分析包括建立地震动强度与结构破坏程度之间的关系以及建立结构破坏程度与经济损失之间的关系两方面^[11]。但是在结构工程中,地震易损性定义为当发生某一强度的地震动时,结构达到或超过某种极限状态的条件失效概率,即

$$F_R(a) = P[L_S | A = a] \quad (1)$$

式中: F_R 为地震易损性; $P[\cdot]$ 为失效概率; A 为随机强度,可以取地震动的有效峰值加速度或有效峰值速度,甚至地震烈度; a 为地震动强度; L_S 为结构的某种性能水准或破坏等级。式(1)定义的地震易损性称为结构的“整体地震易损性”,它代表了结构抵抗地震作用的整体抗力,是结构整体抗震性能的一种概率描述^[12-13]。与此对照的是局部地震易损性,它是指结构的局部性能指标的阈值改变时所得到的结构局部性能指标超过其阈值的概率。

式(1)中改变 a 的数值,计算结构达到或超过破坏状态 L_S 的地震易损性 F_R ,然后采用某种统计方法进行曲线拟合,得到的光滑曲线称为“地震易损性曲线”,其意义为在某一特定的地震烈度作用下,结构遭受特定状态损伤的概率。在地震工程中,易损性定义为在给定的地面运动强度下(如峰值地面加速度、谱加速度、地面运动的频谱或强震持续时间),结构构件或系统失效的条件概率^[14]。

1.2 基本原理

地震易损性是指一个确定区域内由于发生地震造成损失的程度,它是评定震害的一个数值,是对地震预测区内未来地震造成建筑物的破坏和损失的程度做出的预测。若在一次地震中房屋没有抵御地震破坏的能力,全部倒塌了,即“毁灭”,其易损性为 1;相反,若建筑物达到抗震设防标准,在地震中完好无损,则其易损性为 0。地震易损性除了建筑物外,还有人员伤亡、生命线工程、生产设施等不同程度损害数,经济损失和社会影响估计,可能产生的次生灾害及造成的损失数。在分析结构的地震易损性时,需获知建筑物所在场地的地面运动特性和建筑物的恢

复力特性,用结构动力分析的方法可以求出结构的内力和变形等,结合相应的破坏标准,就能评价建筑物的抗震性能并评估其震害^[15]。建筑物的震害分析,是指建筑物遭受某一设防标准的地震影响时,对建筑物可能遭受破坏情况的估计。一般而言,由于地震而使建筑物遭受震害的程度主要与建筑物所在场地的地震危害性和建筑物自身的抗震能力有关。目前,人们常将建筑物按结构特点进行分类,然后定义一个能代表这类建筑物抗震性能的抗力指标(强度、变形等),根据震害资料和结构弹塑性地震反应分析方法,建立建筑物抗力指标和震害程度(破坏状态)之间的关系,并考虑建筑物抗震设防标准、建筑物的体型、构造措施、施工质量、建筑年代等因素的影响,对地震作用下建筑物的震害程度进行评估。这样完成对地震强度和建筑物震害之间关系的分析,即易损性分析^[16]。

2 易损性分析在抗震中的应用

2.1 结构工程

由于地震的随机性和不确定性加大了它的危害性和人们对它的恐惧心理。对于结构抗震来说,结构的承灾能力是一个主要因素,而结构抗震易损性分析是研究抗震必不可少的重要环节。

2.1.1 易损性分析

结构(地震)易损性分析是结构地震风险分析中的核心内容,传统的方法主要分析结构整体地震易损性。整体地震易损性从概率的意义上刻画了在不同地震设防标准条件下结构完成预定抗震性能目标的能力。然而在实际工程中,局部易损性也同样重要,目前的研究方法大都是基于确定性有限元分析和 Monte Carlo 模拟法^[17-20]。

局部地震易损性表达式为

$$F_R(\theta) = P[y(x) \geq \theta] \quad (2)$$

式中: y 为结构局部性能指标; θ 为 y 的阈值;将影响结构地震易损性评估的所有不确定因素用基本随机向量 \mathbf{X} 表示,显然 y 是 \mathbf{X} 实现 x 的隐式函数,记为 $y(x)$; $F_R(\theta)$ 为改变阈值 θ 时所得到的结构局部性能指标 y 超过阈值 θ 的概率。

结构局部地震易损性的可靠度表达式为

$$F_R(\theta) = 1 - \Phi[-\beta(\theta)] = \Phi[\beta(\theta)] \quad (3)$$

式中: β 为结构的可靠指标; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态随机变量的累积分布函数。

采用式(3)计算结构地震易损性的优点就是每次改变 θ 时,只需要进行一次结构可靠度分析即可,

具体计算可采用有限元可靠度方法;如果采用 Monte Carlo 模拟法,为了得到与 θ 对应的一个易损性值,需要进行很多次的非线性有限元分析,因此采用式(3)不但易于掌握并且可以提高效率。

吕大刚等提出用地震易损性曲线来分析框架结构的整体地震易损性。他们选取 1 个 5 层 2 跨钢框架结构,列出其抗力与水平地震作用的统计信息,采用基于位移的非线性纤维梁柱单元建立结构的分布塑性模型,以模拟在强烈地震作用下结构的弹塑性状态;选取结构的底层层间变形作为整体性能指标,采用基于有限元可靠度方法进行结构的非线性静力抗震可靠度分析,得到结构在小震、中震和大震作用下的轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌 4 个性能水准下的整体地震易损性曲线来评价地震的破坏等级概率。

结构的地震易损性分析对于预测结构的抗震性能、进行结构的抗震设计、加固和维修决策具有重要的应用价值。结构的整体地震易损性从概率和宏观角度上描述了结构的抗震性能,从地震易损性曲线可以清晰地看出结构在不同性能水准下随地震动强度变化的规律。地震易损性分析与基于性能的抗震设计具有很多共同点,其中可靠度理论是它们联系的桥梁和纽带,将三者相互结合,形成基于可靠度和性能的全生命周期抗震优化设计理论,是未来抗震设计理论新的发展趋势。

2.1.2 易损性曲线

李鸿晶等^[21]提出用不同地震峰值加速度(PGA)水平下的结构极限状态概率表示结构的抗震易损性。在一个固定的时间间隔内,求出结构任一层间位移的最大概率分布函数,假定跨越水平充分高,求出在时间间隔 $(0, t]$ 内发生跨越的概率。在地震地面加速度的持续时间内,求出结构第 i 层的极限状态概率,也就是给定 PGA 时结构第 i 层的条件失效概率。根据各层的条件失效概率,可以求出结构系统的极限状态概率 P_f

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{f,i}) \quad (4)$$

式中: $P_{f,i}$ 为结构第 i 层的极限状态概率。

针对不同的 PGA 水平,采用重复计算结构的极限状态概率,就可以形成条件失效概率与 PGA 的关系曲线(结构易损性曲线)。文献[21]中将此方法应用于黑龙江省大庆地区的 1 座 3 跨 9 层钢筋混凝土框架结构,验证其可行性与有效性。研究发现,此方法原理简单易于理解掌握,应用方便。

2.2 桥梁工程

桥梁是交通生命线系统中的重要枢纽结构,但是由于自然灾害等因素造成桥梁严重破坏甚至毁坏的事故越来越多;另外过去对桥梁抗震不重视和设防标准偏低,因此开展桥梁的易损性研究,以降低或避免重大的人员伤亡和经济损失显得尤为迫切。但由于在大桥设计阶段掌握和预测其力学、行为特性是比较困难的,所以通过桥梁健康监测获得结构的动静行为来检验大桥的理论模型和计算假定,不仅对设计理论和设计模型有验证作用,而且有利于新的设计理论的形成^[22]。桥梁易损性可以为交通系统可靠性分析、损失评估以及桥梁加固和地震应急决策提供必要的依据,是城市防震减灾重要的基础性工作之一^[23]。

2.2.1 Push-over 分析方法

Push-over 分析方法是通过对结构施加单调递增水平荷载来进行分析的一种非线性静力分析方法。它通常将相邻伸缩缝之间的桥梁结构当作空间独立框架考虑,上部结构通常假定为刚性。分析的初始阶段是对单独的桥墩在所考虑的方向上(顺桥向或横桥向)进行独立的倒塌分析,以期获得构件在单调递增水平荷载作用下的整个破坏过程及变形特征;之后,整个框架的分析是将桥墩刚度模拟为非线性弹簧,计算出整体框架的初始刚度、横向刚度和转动刚度以及质心处的等效刚度。在框架质心处,通常是在上部结构的质心处施加单调递增的水平力,并且随着框架非线性发展的程度,不断调整各个桥墩的刚度和结构的刚度,直至结构达到最终极限状态为止^[24]。该方法的优点在于既能对结构在多遇地震下的弹性设计进行校核,也能够确定结构在罕遇地震下潜在的破坏机制,找到最先破坏的薄弱环节,从而使设计者仅对局部薄弱环节进行修复和加强;而利用传统的弹性分析,对不能满足使用要求的结构,可能采取增加新的构件或增大原来构件截面尺寸的办法,结果是增加了结构刚度,造成了一定程度的浪费,也可能存在新的薄弱环节和隐患。汪大绥等^[25]对 1 个 15 层框架-剪力墙结构进行了抗震分析,结果表明,Push-over 方法不仅能够对结构在多遇地震下的弹性反应谱计算结果进行检验,而且更重要的是可以对结构在遭受罕遇地震后可能出现的破坏状况进行较精确的分析,比现行抗震规范中关于结构在罕遇地震作用下薄弱层(部位)弹塑性变形计算方法更进了一步。

总之,Push-over 方法概念清晰,实施相对简

单,能迅速找到结构的薄弱环节。当然,该方法存在的不足之处就是在剪力墙的准确模拟方面,还需要进一步研究。

2.2.2 易损性曲线法

桥梁结构的易损性曲线根据其获取方法分为经验易损性曲线和理论易损性曲线。前者是通过过去地震中的破坏报告分析得到的,后者是通过对桥梁结构的地震动响应分析而得到的。

关于易损性曲线的分析,徐龙军等^[26]统计了在唐山大地震中破坏的 272 座铁路桥梁,分析它们的破坏概率,并对唐山大地震和海城地震中 56 座遭受地震破坏的桥梁按结构构造特征进行了分类,分析出各种构造特征对结构易损性的贡献率;描绘出铁路桥梁在不同烈度地震作用下的破坏概率累积曲线,并提出了一种预测铁路桥梁地震震害的方法。Shinozuka^[27]等基于 1995 年神户地震中观测到的桥梁损伤数据,建立了桥梁墩柱的经验易损性曲线。日本道路工团在 1995 年的阪神地震之前,沿着它的高速道路布置了 123 台加速度仪,地震后,又增设了 202 台,他们用这些仪器测出地震烈度、速度、加速度等数据,用来建立桥梁震害与地震动参数间的关系,以此得到经验易损性曲线。

在理论易损性曲线方面,Shinozuka 等在对桥梁结构的易损性进行分析时,对各种特定的结构模型采用了 Monte Carlo 模拟法。Hang 等提出了一种基于结构动力行为的数值模拟的分析方法来形成易损性曲线;Kai 等为了节省计算时间,提出了利用频域内的随机振动理论来评估结构响应的易损性分析方法;Shinozuka 等^[28]采用此方法检验桥梁的易损性曲线,用时程分析法和能力谱法 2 种不同的方法得到结构的响应。Karim 等^[29-30]提出了用数值分析模拟方法来建立理论易损性曲线,之后又提出一种简化的数值模拟分析方法。Singhal 等^[31]采用贝叶斯原理分析结构的损伤程度,用得到的数据进行易损性评估,建立易损性曲线。在获得桥梁结构的地震易损性曲线后,再对桥梁在地震作用下的破坏状态进行评估和分析。

由此可见,经验易损性曲线是根据已有的实际震害数据得到的,结果可信度高,但是由于实际情况的不同,受到具体条件的限制,经验易损性曲线原则上只适用于与已有的震害数据类似的情况,使用范围比较狭窄,另外由于经验易损性曲线不易得到,难于推广使用。理论易损性曲线使用范围广泛,结果比较准确,但是由于易损性分析的理论研究所限,易

损性曲线更多地适用于公路桥梁。

2.2.3 经验统计法

经验统计法是先根据历史震害经验,桥梁抗震理论及桥梁样本所提供的资料,选择影响桥梁震害的主要因素,再根据大量样本进行各影响因素的影响方式和权值的统计回归,从而建立桥梁易损性分析方法^[32]。

周神根等^[33]统计了唐山地震中遭到破坏的 272 座铁路桥梁的震害资料,建立了铁路桥梁的易损性计算公式

$$y = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N \delta(j, k) b_{jk} + \sum_{i=1}^2 b_i x_i \quad (5)$$

式中: b_{jk} 为定性变量系数; b_i 为定量变量系数; x_i 为定量变量数值; i 为定量变量序号; j 为定性变量序号; M 为定性变量个数; k 为定性变量类别序号; N 为第 j 个变量中类别数; $\delta(j, k)$ 为表征数。

朱美珍^[34]统计了唐山、海城、通海地震中 100 多座公路桥梁的震害情况,建立了公路桥梁的非线性易损性计算公式

$$A = W_0 \prod_{j=1}^M \prod_{k=1}^N W_{jk}^{\delta(j, k)} \quad (6)$$

式中: A 为易损性指数; W_0 、 W_{jk} 为计算系数,根据待测桥梁的具体资料取值。

杜鹏^[35]共统计了较大公路桥 9 座,其中 2 座为古桥,此外尚有小桥上百座,来验证桥梁震害的分析方法,得出的结论为:区域内桥梁易损性分析主要采用经验统计法,这种方法可给出群体桥梁的震害分析结果,还有不同地震烈度作用下桥梁的大致破坏情况,使用时除采用公式提出的震害因子和权值对照取值之外,最好结合实际情况,加入经验修正,对结果进行必要的强度补充并将外界累积影响条件作为变量加入到预测公式中,会使得震害预测更加贴近实际^[36]。

经验统计法提出的相对较早,发展比较完善,应用较多,且计算简单,使用起来经济方便,但它在对单体、重要大型桥梁的抗震性能评估方面略显不足,通常采用多种方法共同使用,以减小统计的误差。

2.2.4 其他方法

结构易损性分析方法除上述方法外,还有规范校核法、基于人工神经网络的桥梁易损性分析方法、基于模糊数学和灰色系统理论的分析方法、时程反应分析的方法、计算屈服强度系数法等。每种方法都有自己的优点和不足,使用时应根据实际情况采用合适的方法。

3 易损性分析在结构健康监测中的应用

3.1 易损性分析与健康监测系统的开发

多年来,大型工程结构(桥梁、超高层建筑和海洋平台)的安全状况一直是各级政府部门和人们关注的热点,目前各国许多大型结构都存在着不同程度的安全隐患,结构损坏及倒塌事故逐年增加。造成这些事故的原因很复杂,抛开设计与施工方面的原因不谈,这些工程结构长期处于超负荷运营状态,致使许多构件的疲劳损伤加剧。结构健康监测系统的研究与开发正是在此基础上应运而生的^[37]。结构健康监测是集结构监测、系统辨识和结构评估于一体的综合监测系统。其监测内容包括:结构响应监测[集合变位、振动响应(位移、速度、加速度)、构件应变或应力等]、环境荷载监测(交通荷载、风荷载、温度荷载、地震及船舶撞击荷载等)^[38]。根据监测信息,结构健康监测系统对结构状态进行评估,为结构的维护、维修与管理决策提供依据和指导^[39]。

目前各国已经成功开发了许多大型结构健康监测系统,刘文峰等采用基于应变模态得到的广义应变能密度的结果作为评估参数来确定杭州湾跨海大桥健康监测系统中应变传感器的最优布点,研发了大桥健康监测安全评估系统。缪长青等^[40]在润扬长江大桥的健康监测中,对大桥的结构设计特点、环境状况、营运工况等进行了详细的分析研究,建立了一个科学的、精细的三维有限元模型。通过对理论模型进行静动力分析,确定结构应力集中点、位移幅值点等关键部位,进而确定了传感器布设的最优方案并开发了大桥健康监测系统。Ou 等^[41]对大型结构健康监测系统在海洋平台、桥梁、大跨空间结构、建筑、水利工程中的应用进行了总结,并对其现状及存在的问题进行了评述。

由第 1、2 节可知,易损性分析是通过分析结构构件的组合方式和结构可能发生的破坏情况,研究结构中的薄弱部位。当结构受到意外损伤或是地震等灾害,造成某个构件的破坏时,它所承担的荷载就会重新分布到相邻的构件上,其相邻的构件又遭到破坏,继续进行荷载重分配,直到整个结构毁坏,这个过程就是结构的一条失效路径。其中最先失效并最终引起结构破坏的构件就是结构最薄弱部位,也是结构中最重要、易损的构件。由此可见,采用易损性分析来寻找结构失效路径,找到易损构件进行安

全设计,进而进行结构健康监测系统的设计是可行的。孙利民等基于这一原理,对东海大桥进行了结构健康监测系统设计,取得了良好效果。

3.2 易损性分析在传感器优化中的应用

3.2.1 常用传感器优化布置方法及应用

对于一个大型结构,其健康监测系统是由大量的传感器构成的,传感器的数量庞大不仅带来经费的增加、维护的负担,而且会产生海量的数据,因此传感器的优化布置是一个很重要的问题。传感器的优化布置方法很多,如模态动能法、Guyan 模型缩减法、奇异值分解法和遗传算法。

模态动能法针对每一个目标的振型绘制出各自的模态动能分布图,将传感器布置在模态动能较大的位置。其缺点是高度依赖于有限元网格的划分。由模态动能法衍生出的方法有平均模态动能法和特征向量乘积法。前者主要是简单计算平均动能值,从较大值中选择传感器的测点,这种方法消除了节点动能的影响;后者主要是计算有限元分析的模态振型在可能出现的位置的乘积,选择在较大乘积处布置传感器,这种方法避免了传感器布置在振型节点上。

Guyan 模型缩减法是一种比较简单的计算方法,通过计算刚度矩阵对角线元素与质量矩阵对角线元素的比值,删除比值较大的位置,该方法能较好地保留低阶模态,但不一定代表待测模态。谢强等^[42]提出了一种基于模型减缩和线性模型估计理论的传感器布置新算法。根据选定的主、从自由度,用改进的减缩系统方法来减少初始结构的自由度数目;然后,基于线性模型估计,以所选定的目标模态为线性模型的设计矩阵,用奇异值分解处理设计矩阵;用分解后的前几个左奇异向量计算每一个自由度对于结构模态的贡献;最后用迭代算法来确定所需的传感器数量和位置。该方法被用于 1 栋 15 层 2 跨钢结构框架,结果表明,此种混合算法适用于建筑结构监测的传感器最优布置。

奇异值分解法是通过对待测的模态矩阵进行奇异值分解,评价 Fisher 信息矩阵,舍弃没有作用的点。该方法能够使目标模态矩阵线形独立,还避免了在振型接近线性相关情况下的奇异性问题,而且提出了每一次迭代时舍弃测点的允许数目,通过重复迭代,得到需要的传感器数目。

遗传算法采用有限元模型计算结构的各阶模态,确定解群的大小,根据需要测量的模态,选取适当的适应度,用适应度评估解群中各个解的优劣,选

择较优的解进行遗传操作,寻找传感器的最优布置。李戈等^[43]将遗传算法应用于香港青马桥,结果表明,遗传算法在搜索悬索桥监测系统中传感器的最优布点结构稳定可靠,收敛迅速。

以上几种方法应用比较多,但都具有各自的局限性,目前对传感器在结构健康监测系统中有效性的要求越来越高,如果传感器的位置没有经过慎重的选择,搜集到的信息就不能有效地反映结构的健康状况,这样监测系统作用也就非常有限。解决这个问题的合理方法就是对健康监测系统中的传感器系统进行最优布置,结构易损性分析为解决这个问题提供了有效的方法与工具。

3.2.2 基于易损性分析的传感器最优布置

易损性分析在传感器优化布置中的研究还比较少,但具有很大的发展空间。用易损性分析法找到结构最易破坏的点及其失效路径,进而布置传感器,不仅容易理解而且计算工作量较小,笔者正致力于这方面内容的研究,即先确定结构各构件的重要性系数,通过其与冗余度的关系来分析构件的内力承担及结构的不断内力重分配,进而通过优化计算寻找一条最合理的有效的失效路径,从而确定传感器的最优布点,使其更好地指导结构健康监测系统的概念设计与开发。

于刚等基于结构的平衡矩阵和相容矩阵,提出了一种适用于桁架传感器优化的易损性分析方法,即先选取一个铰接杆件结构体系,考虑所有的基础节点都被完全约束,列出其平衡方程,采用同样的方法得到所有非约束节点的平衡方程,并得到一个平衡矩阵 \mathbf{A} 及一个相容矩阵 \mathbf{B} ,根据虚功原理得

$$\mathbf{B}^T = \mathbf{A} \quad (7)$$

用 r 表示矩阵 \mathbf{A} 的秩, b 为结构的杆件数, N 为非约束节点数,非约束节点位移数为 $n=3N$,独立的机构位移数为 $m=n-r$,结构自应力模态数为 $s=b-r$,根据 s 、 m 的值,判别结构是否失效。最后用一超静定平面桁架桥验证了上述方法的有效性。研究表明,该方法可以用于特定荷载作用下桁架结构的易损性分析,并可以指导桁架结构传感器的最优布置。虽然用该方法可以找到结构的最易损路径,但它仅适用于桁架结构。

柳承茂等提出用构件的重要性系数来描述结构的易损性进而建立其与冗余度的关系。构件的重要性即构件在整个结构中的重要程度,重要性系数越大构件在结构中越重要,它的破坏越容易引起结构大范围的破坏,此构件的存在就增加了结构的易损

性;反之,就增加了结构的鲁棒性。构件的重要性系数越小,构件受到的冗余约束就越多,其失效以后,较多替代传力路径的存在更可能将荷载重分布到结构的其他部分。当构件重要性系数 $\alpha_i = 0$ 时,构件受到完全约束,其失效对结构体系没有影响;反之,构件重要性系数越大,构件受到的冗余约束越少,则其失效以后,较少的替代传力路径可能无法保证荷载重分布到结构的其他部分;当构件重要性系数 $\alpha_i = 1$ 时,构件没有多余约束,其失效将导致结构体系的局部或整体失效。

桁架体系的重要性系数可用式(8)求得

$$\alpha_i^N = N_i \quad (8)$$

式中: N_i 为任意杆件 i 两端施加单位平衡力系后该杆件的轴力。

刚架体系的任意构件 i 的重要性系数为

$$\alpha_i = \alpha_i^N + \alpha_i^Q + \alpha_i^M \quad (9)$$

式中: $\alpha_i^Q = Q_i$; $\alpha_i^M = M_i$; Q_i 、 M_i 分别为杆件 i 两端施加的单位剪力和弯矩。

通过最小势能原理对构件重要性与结构冗余度之间存在的关系进行证明,得出基于刚度的构件重要性系数与冗余度存在如下的关系

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n (1 - \alpha_i) &= r && \text{平面桁架} \\ \sum_{i=1}^n (3 - \alpha_i) &= r && \text{平面刚架} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

文献[4]中通过2个算例验证了该方法的有效性。研究表明,构件在结构中的相对重要性能反映结构中的薄弱位置,但该文只是求出各个杆件的重要性系数即结束。笔者在此基础上正在做进一步的研究,通过杆件的重要性系数来推出各个杆件的破坏顺序,借此来形成一条失效路径,这样就可以把此方法应用于传感器的优化中,更好地为结构的健康监测服务。

4 结 语

对易损性分析的研究与应用主要集中在抗震方面,它在结构健康监测中的研究与应用尚属于起步阶段,本文中笔者对已有的方法及应用进行了述评,提出了用构件的重要性系数来寻找结构的失效路径,以此来确定传感器的最优布设,并进行结构健康监测系统的研发。本文只是起个抛砖引玉的作用,希望激励更多的学者投入到这一研究方向中来,推动易损性分析理论的完善,让更多的工程师接受结构易损性分析并推动其工程应用。

参考文献:

References:

- [1] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 82-90.
LI Hong-nan, LI Dong-sheng. Safety Assessment, Health Monitoring and Damage Diagnosis for Structures in Civil Engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 82-90.
- [2] 邱德锋,周艳,刘西拉. 突发事故中结构易损性的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(2): 55-59.
QIU De-feng, ZHOU Yan, LIU Xi-la. Study on the Structural Vulnerability Under Unexpected Conditions[J]. Sichuan Building Science, 2005, 31(2): 55-59.
- [3] LAM H F. On the Complexity of Artificial Neural Networks for Smart Structures Monitoring[J]. Engineering Structures, 2006, 28(7): 977-984.
- [4] 柳承茂,刘西拉. 基于刚度的构件重要性评估及其与冗余度的关系[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 746-750.
LIU Cheng-mao, LIU Xi-la. Stiffness-based Evaluation of Component Importance and Its Relationship with Redundancy[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(5): 746-750.
- [5] 左云,陈明宪,赵跃宇. 桥梁健康监测及传感器的优化布置[J]. 公路, 2004(4): 90-94.
ZUO Yun, CHEN Ming-xian, ZHAO Yue-yu. Health Monitoring of Bridges and Optimal Placement of Sensor[J]. Highway, 2004(4): 90-94.
- [6] LIND N C. A Measure of Vulnerability and Damage Tolerance[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1995, 48: 1-6.
- [7] ZIHA K. Event Oriented Analysis of Series Structural Systems[J]. Structural Safety, 2001, 23(1): 1-29.
- [8] BEEBY A W. Safety of Structures and a New Approach to Robustness[J]. The Structural Engineer, 1999, 77(4): 16-21.
- [9] LU Z, WOODMAN N J, BLOCKLEY D I. A Theory of Structural Vulnerability[J]. The Structural Engineer, 1999, 77(18): 17-24.
- [10] 吕大刚,王光远. 基于可靠度和灵敏度的结构局部地震易损性分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 157-162.
LU Da-gang, WANG Guang-yuan. Local Seismic Fragility Analysis of Structures Based on Reliability and Sensitivity[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 157-162.

- [11] 张菊辉. 基于数值模拟的规则梁桥墩柱的地震易损性分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.
ZHANG Ju-hui. Study on Seismic Vulnerability Analysis of Normal Beam Bridge Piers Based on Numerical Simulation[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [12] 吕大刚, 李晓鹏, 王光远. 基于可靠度和性能的结构整体地震易损性分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(2): 107-114.
LU Da-gang, LI Xiao-peng, WANG Guang-yuan. Global Seismic Fragility Analysis of Structures Based on Reliability and Performance[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(2): 107-114.
- [13] 吕大刚, 李晓鹏, 王光远. 土木工程结构地震易损性分析的有限元可靠度方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(增): 264-272.
LU Da-gang, LI Xiao-peng, WANG Guang-yuan. Finite Element Reliability Methods for Seismic Fragility Analysis Civil Engineering Structures[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(S): 264-272.
- [14] 张菊辉, 胡世德. 桥梁地震易损性分析的研究现状[J]. 结构工程师, 2005, 21(5): 76-80.
ZHANG Ju-hui, HU Shi-de. State of the Art of Bridge Seismic Vulnerability Analysis Research[J]. Structural Engineers, 2005, 21(5): 76-80.
- [15] 王 丹. 钢框架结构的地震易损性及概率风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
WANG Dan. Seismic Fragility Analysis and Probabilistic Risk Analysis of Steel Frame Structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [16] 常业军, 吴明友. 建筑物结构易损性分析及抗震性能比较[J]. 山西地震, 2001(1): 23-25.
CHANG Ye-jun, WU Ming-you. Construction Vulnerability Analysis and Earthquake-proof Quality Comparison[J]. Earthquake Research in Shanxi, 2001(1): 23-25.
- [17] ELLINGWOOD B R. Earthquake Risk Assessment of Building Structures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 74(3): 251-262.
- [18] CHOI E, DESROCHES R, NIELSON B. Seismic Fragility of Typical Bridges in Moderate Seismic Zones[J]. Engineering Structures, 2004, 26(2): 187-199.
- [19] ERBERIK M A, ELNASHAI A S. Fragility Analysis of Flat-slab Structures[J]. Engineering Structures, 2004, 26(7): 937-948.
- [20] KIM S H, SHINOZUKA M. Development of Fragility Curves of Bridges Retrofitted by Column Jacketing[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 19(1/2): 105-112.
- [21] 李鸿晶, 冯启民, 王中生. 平面框架结构抗震易损性的简化分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(4): 18-25.
LI Hong-jing, FENG Qi-min, WANG Zhong-sheng. A Simplified Approach to Vulnerability Analysis for Earthquake-resistant Plane Frame Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(4): 18-25.
- [22] HWANG H, 刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 47-51.
HWANG H, LIU Jing-bo. Seismic Fragility Analysis of Reinforced Concrete Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(6): 47-51.
- [23] 申选召, 林均岐, 李谊瑞, 等. 桥梁易损性研究述评[J]. 世界地震工程, 2006, 22(2): 97-103.
SHEN Xuan-zhao, LIN Jun-qi, LI Yi-rui, et al. State-of-the-art of Studies on Vulnerability of Bridges[J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(2): 97-103.
- [24] 叶燎原, 潘 文. 结构静力弹塑性分析(Push-over)的原理和计算实例[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(2): 37-43.
YE Liao-yuan, PAN Wen. The Principle of Nonlinear Static Analysis(Push-over) and Numerical Examples[J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(2): 37-43.
- [25] 汪大绥, 贺军利, 张凤新. 静力弹塑性分析(Pushover Analysis)的基本原理和计算实例[J]. 世界地震工程, 2004, 20(1): 45-53.
WANG Da-sui, HE Jun-li, ZHANG Feng-xin. The Basic Principle and a Case Study of the Static Elastoplastic Analysis (Pushover Analysis) [J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20(1): 45-53.
- [26] 徐龙军, 章 倩. 铁路桥梁地震震害预测[J]. 山东建筑工程学院学报, 2003, 18(1): 27-31.
XU Long-jun, ZHANG Qian. Earthquake Damage Prediction of Railroad Bridge[J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2003, 18(1): 27-31.
- [27] SHINOZUKA M, FENG M Q, LEE J, et al. Statistical Analysis of Fragility Curves[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1224-1231.
- [28] SHINOZUKA M, FENG M Q, KIM S H, et al. Nonlinear Static Procedures for Fragility Curve Development[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1287-1295.
- [29] KARIM K R, YAMAZAKI F. Effect of Earthquake Ground Motions on Fragility Curves of Highway Bridge Piers Based on Numerical Simulation[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,

- 2001,30(12):1839-1856.
- [30] KARIM K R, YAMAZAKI F. A Simplified Method of Constructing Fragility Curves for Highway Bridges [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(10): 1603-1626.
- [31] SINGHAL A, KIREMIDJIAN A. Bayesian Updating of Fragilities with Application to RC Frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124 (8): 922-929.
- [32] 胡 勃, 袁万城, 王君杰, 等. 大型桥梁结构抗震分级设防与安全评定标准 [J]. 世界地震工程, 1998, 14 (1): 1-9.
- HU Bo, YUAN Wan-cheng, WANG Jun-jie, et al. Criteria for Multi-level Seismic Design and Safety Evaluation of Bridges [J]. World Earthquake Engineering, 1998, 14(1): 1-9.
- [33] 周神根, 王天威, 杨春环. 铁路桥梁震害预测和抗震加固 [J]. 铁道建筑, 1991, 8: 4-9.
- ZHOU Shen-gen, WANG Tian-wei, YANG Chun-huan. Prediction and Reinforcement of Earthquake Damage of Railway Bridges [J]. Railway Engineering, 1991, 8: 4-9.
- [34] 朱美珍. 公路桥梁震害预测的实用方法 [J]. 同济大学学报, 1994, 22(3): 279-283.
- ZHU Mei-zhen. A Practical Method for Predicting Seismic Damage of Highway Bridges [J]. Journal of Tongji University, 1994, 22(3): 279-283.
- [35] 杜 鹏. 钢筋混凝土桥梁的地震易损性分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(1): 89-93.
- DU Peng. Seismic Vulnerability Analysis of Reinforced Concrete Bridge [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(1): 89-93.
- [36] 王东升, 冯启民. 桥梁震害预测方法 [J]. 自然灾害学报, 2001, 10(8): 113-118.
- WANG Dong-sheng, FENG Qi-min. Seismic Damage Assessment Methods for Bridges [J]. Journal of Natural Disasters, 2001, 10(8): 113-118.
- [37] 贾 明. 远程结构健康(应变)监测系统的设计与研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- JIA Ming. Design and Research on Remote Structural Health (Strain) Monitoring System [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [38] 何旭辉. 南京长江大桥结构健康监测及其关键技术研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- HE Xu-hui. Study on the Structural Health Monitoring of Nanjing Yangtze River Bridge and Its Key Technologies [D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [39] 刘文峰, 张劲泉, 何玉珊, 等. 杭州湾跨海大桥监测系统中应变传感器的优化布点 [J]. 公路交通科技, 2005, 22(12): 81-83.
- LIU Wen-feng, ZHANG Jin-quan, HE Yu-shan, et al. Optimal Placement of Strain Sensors for Monitoring System on Hangzhou Bay Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(12): 81-83.
- [40] 缪长青, 李爱群, 韩晓林, 等. 润扬大桥结构健康监测策略 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35 (5): 780-785.
- MIU Chang-qing, LI Ai-qun, HAN Xiao-lin, et al. Monitor Strategy of the Structural Health Monitoring System of Runyang Bridge [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35 (5): 780-785.
- [41] OU J P, LI H. The State-of-the-art and Practice of Structural Health Monitoring for Civil Infrastructures in the Mainland of China [C]//OU J P, LI H, DUAN Z D. Proceeding of the 2nd International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure. New York: Taylor & Francis, 2005: 69-88.
- [42] 谢 强, 薛松涛. 结构健康监测传感器优化布置的混合算法 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6): 726-731.
- XIE Qiang, XUE Song-tao. A Hybrid Algorithm for Optimal Sensor Placement of Structural Health Monitoring [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(6): 726-731.
- [43] 李 戈, 秦 权, 董 聪. 用遗传算法选择悬索桥监测系统中传感器的最优布点 [J]. 工程力学, 2000, 17 (1): 25-34.
- LI Ge, QIN Quan, DONG Cong. Optimal Placement of Sensors for Monitoring Systems on Suspension Bridges Using Genetic Algorithms [J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(1): 25-34.