

文章编号: 1000-4750(2007)Sup.I-0079-04

结构鲁棒性与风险防控

*方召欣, 李惠强

(华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 结构鲁棒性要求结构在突发损伤情况下, 不致引起与此损伤不相称的破坏。近年来, 结构鲁棒性的意义得到广泛的认同。重点是结构鲁棒性的概念与评价及其在突发损伤风险防控中的作用。基于结构鲁棒性的能量解释, 提出以结构在特定承载力水平下的消能能力的无量纲形式作为结构鲁棒性指标, 并以简支梁为例作了说明。突发损伤后的风险防控要求结构具有鲁棒性。从四个方面讨论了加强结构鲁棒性的相关措施。最后, 全文进行了总结。

关键词: 结构工程; 鲁棒性; 突发损伤; 不相称破坏; 消能; 风险

中图分类号: TU312⁺.3; TU352 **文献标识码:** A

STRUCTURAL ROBUSTNESS AND RISK MITIGATION

*FANG Zhao-xin, LI Hui-qiang

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Structures must be robust so that in case accidental damage occurs, they will not suffer damage disproportionate to the original cause. The awareness of the significance of structural robustness has intensified over the years. This article focuses on the concept and appraisal of structural robustness, as well as its role in risk mitigation for structures under accidental damage. Structural robustness is explained on the basis of energy principles. Further, a new quantitative measurement of structural robustness is developed, in which a dimensionless form of the energy absorption capacity of a structure satisfying the requirement of specific load-bearing capacity serves as a robustness index. A simply-supported beam is adopted to illustrate the use of the robustness index. Structural robustness plays a key role in risk mitigation. Several means of enhancing structural robustness are presented. Finally, the entire paper is summarized.

Key words: structural engineering; robustness; accidental damage; disproportionate failure; energy absorption; risk

结构安全应满足两个层次: (1) 结构在正常设计作用下可完成预定功能; (2) 结构在突发/偶然作用造成突发损伤情况下, 不致造成与此损伤不相称的破坏, 如连续坍塌。

对第一个层次, 现行的设计方法如极限状态与分项系数法、荷载与局部抗力系数设计法(LFRD)等是卓有成效的; 但现有结构设计理论的出发点是假设结构在无损的情况下抵抗各种环境作用^[1], 往

往没有考虑结构局部损伤对结构其他部分的影响。实际上, 结构在突发局部损伤状态下的系统安全更需谨慎对待, 原因是突发损伤可能导致结构其他部分的失效, 这就涉及结构鲁棒性要求。鲁棒性要求要求结构在突发局部损伤后不会引起不相称破坏。这里, 突发损伤状态是指某种突发/偶然作用引起的结构损伤, 是与长期累积效应或与耐久性有关的损伤相区别的。

收稿日期: 2006-08-10; 修改日期: 2006-10-20

作者简介: *方召欣(1978), 男, 山东荣成人, 博士生, 从事结构系统安全与可靠性研究(E-mail: fangzhao_xin@yahoo.com.cn);

李惠强(1944), 男, 江西宜春人, 教授, 工学学士, 博导, 从事结构补强与加固、工程管理研究(E-mail: lihuiqiang@vip.sina.com).

英国结构安全常设委员会(SCOSS)在多期的双年度报告中强调,建筑结构都应该满足“抵抗不成比例破坏的要求,即鲁棒性要求”,尤其是那些可能聚集大量人群的建筑^[2]。在北美,“结构整体性”是与“鲁棒性”平行的概念^[3~5]。1995年俄克拉荷马 Alfred P. Murrah 联邦大楼爆炸和纽约世贸中心 9·11 等事件使结构工程面临了新考验,也对结构鲁棒性研究提出了更迫切的要求。

对结构鲁棒性进行研究,有针对性地评价结构对突发损伤的敏感性或承受能力,可以为突发损伤后的风险防控提供概念上和实践上的指导。本文首先简要介绍结构鲁棒性,然后基于结构鲁棒性的能量解释,提出一种新的结构鲁棒性评价指标;其次,探讨结构鲁棒性对突发损伤后的风险防范和控制的意义以及提高结构鲁棒性的途径和思路;最后,全文进行了总结。

1 结构鲁棒性概念与评价

1.1 结构鲁棒性的概念

鲁棒译自英文“Robust”,具有坚固、耐久、强健等含义。鲁棒性的概念在自然科学、工程科学和社会科学等领域中具有不同含义;土木工程中,鲁棒性的概念曾运用在结构振动控制和计算方法等方面。

“结构本身是鲁棒的”不是指结构承载力、可靠度、冗余度有多高,或者多坚固。结构鲁棒性强调的是结构在外界干扰下保持系统安全的能力,即结构在突发/偶然作用造成突发损伤情况下,不致造成与此损伤不相称的破坏。结构工程中,这个概念的提出与连续坍塌有直接联系。1968年,伦敦坎宁镇的 Ronan Point 公寓 18 楼瓦斯爆炸将该层一侧承重角的承重墙板炸坏,引发事故一侧角部自上而下连续坍塌,引起了工程界对突发损伤后结构安全性的高度重视。至今,欧洲和北美在结构鲁棒性方面的研究和探索也主要集中于对结构连续坍塌的防范和控制^[5]。

尽管当前对于结构鲁棒性还没有一个公认的清晰、有效的评价体系,但这样一个概念的认识是在长期以来对结构系统安全经验的总结和归纳的基础上提出的,这本身就有着非常重要的意义。

1.2 结构鲁棒性能量解释

结构材料的破坏需要吸收或耗散能量(统称消纳能量,简称消能),因此以能量的观点分析结构的

破坏是合理可行的。结构与外界作用之间存在着普遍的能量(或功,下同)转换关系;分析时,随机作用对结构的影响可视为某种能量输入。用能量观点考察结构失效的优势还在于它能反映损伤的发展过程,能够概括变形、强度、承载力等物理、力学性质的变化。

按照热力学第一定律,在任意设定边界的封闭系统中能量是守恒的。当随机作用对结构输入能量时,构件与节点需要充分消能。和构件层次相比,结构系统失效更为复杂,仅以消能能力来解释是不完备的。当构件的破坏引起结构其余部分即刻丧失承载能力(如形成机构)时,结构的失效是由于外部作用所释放的能量向结构消能的转化受到抑制。以图 1(a)所示的桁架结构为例,当弦杆 2 失效后,结构其余部分成为几何可变的机动体系(图 1(b)),这种情况下,结构是由于无法将外部作用所释放的能量继续转化而破坏。

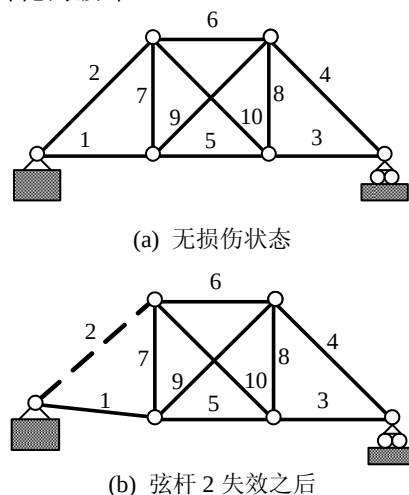


图 1 桁架结构

Fig.1 A truss structure

至此,可以总结出结构系统鲁棒性的能量解释:当结构在不发生与初始损伤不相称破坏的情况下能够充分消纳或转化外部的能量输入时,结构是鲁棒的;反之,由于结构无法将外部的能量输入有效转化或消纳,损伤范围无法控制。以能量原理评价鲁棒性的优势在于能量原理的普遍适用性,能够为不同的材料和结构形式的结构鲁棒性分析提供概念上的指导。

1.3 结构鲁棒性评价

Beeby 提出以构件失效之前的消能能力 E_u 来评价其鲁棒性, $E_u = e_c \cdot V$, 其中, V 和 e_c 分别为构件的体积与单位体积的消能能力;对于结构系

统,可以假设,如果每个构件都满足鲁棒性要求,结构也可以满足^[6]。Beeby 的鲁棒性评价指标没有考虑构件的实际承载力水平,因此在不同设计要求或不同材料之间不具有可比性。

结构系统鲁棒性可以从正常设计作用与突发作用下的结构分析设计两个层次上加以实现。常规结构设计方法可以通过一系列参数对结构及其环境因素加以考虑,从而确保结构在正常设计作用下的可靠性。对第二个层次,突发作用难以有效分析,但它取决于结构及其环境。因此,结构鲁棒性的评价与实现可与常规结构分析和设计思路有效结合。

本文将结构的鲁棒性指标 I_{rob} 改进为:结构在满足特定要求的承载能力(或容许变形)基础上的消能能力的无量纲形式,即

$$I_{rob} = E_u / E_d \quad (1)$$

式(1)中,指定 E_u 和 E_d 分别为结构达到破坏极限承载状态和设计承载极限状态之前所消纳的能量。以跨中受集中荷载作用的简支梁静力加载为例,其荷载-变形曲线如图 2, A 和 B 对应设计承载极限状态和破坏极限状态点,在横轴的投影分别为 δ_A 和 δ_B 。按照本文建议的鲁棒性指标(式(1)),该简支梁的鲁棒性指标 I_{rob} 为梁达到破坏极限状态点 B 所消纳的外力功($OAB\delta_B$ 所围的面积)与梁在达到设计极限状态 A 所消纳的外力功(OAd_A 的面积)的比值,即 $I_{rob} = \int_0^{\delta_B} P(x)dx / \int_0^{\delta_A} P(x)dx$, 其中 $P(\cdot)$ 为加载函数。

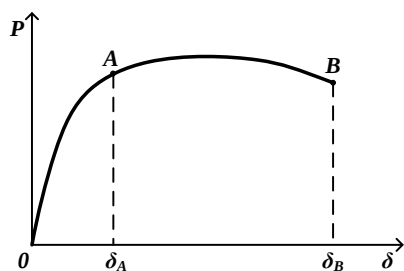


图 2 某简支梁的荷载-变形曲线

Fig.2 Load-deformation diagram of a simple beam

由于考虑了构件实际承载力水平,该指标在不同设计要求和不同材料构件之间具有可参照性。另外,构件在超出设计承载状态后通常发生不可逆变形,进入损伤阶段。这时鲁棒性指标 I_{rob} 反映了构件在损伤状态下的消能能力,也体现了构件对损伤的容纳程度。显然,鲁棒的构件应当在完全破坏之前尽可能多地消纳能量。对于钢筋混凝土构件,这一点可以通过有效的构造措施来加以确保。实际

上,构件消能过程中的延性破坏还有助于缓解结构损伤扩展过程中的动态效应,如断裂引发的冲击。

除了构件的消能性能,结构系统鲁棒性主要还受到结构冗余性的显著影响。结构冗余有局部和整体之分,它们对结构鲁棒性的贡献存在本质区别。仍以图 1(a)为例,结构中编号从 5~10 的弦杆所组成的表决系统对桁架系统而言是局部冗余的,若其中某一个构件损伤甚至退出承载,系统不致即刻坍塌;边弦杆 1、边弦杆 2、边弦杆 3、边弦杆 4 是桁架的基本部分,对桁架整体而言是非冗余的,任意一个失效都会导致系统无法将外部作用所释放的能量继续转化而导致整体失效。2006 年 1 月前后,发生在俄罗斯、德国等地的游泳馆与溜冰馆屋顶坍塌事件表明,应当对一些特殊结构形式(如大跨空间结构)的冗余性能对鲁棒性的影响给予充分重视。

对于结构冗余性能,不少研究者从确定性、概率或熵的角度进行过研究,但尚未形成有效的评价体系。以下两个问题仍亟待解决:如何有效评价结构在局部损伤,承载方式或边界条件改变前后的冗余性能;怎样衡量结构局部和整体冗余对鲁棒性的贡献。需要注意的是,对结构系统效应的分析仅靠常规结构分析理论是不够的,需要结合逻辑或决策分析方法进行。

2 突发损伤风险防控

2.1 风险防控与结构鲁棒性

实际中,结构工程事故所引发的经济损失、人员伤亡等与结构的破坏程度密切相关。因此,有效减轻或控制结构的破坏程度是工程防灾减灾的关键任务。

结构在突发损伤下发生不成比例破坏的风险 R_r 可表示为:

$$R_r = P(D_r D_1) C_r = P(D_r | D_1) P(D_1) C_r \quad (2)$$

其中, D_1 和 D_r 分别指结构的突发损伤和不相称破坏状态, C_1 和 C_r 分别对应其失效损失; $P(D_r D_1)$ 为结构突发损伤并导致不相称破坏的概率,进一步表示为在条件 D_1 下发生 D_r 的概率 $P(D_r | D_1)$ 与 D_1 的概率 $P(D_1)$ 的乘积。

结构破坏在很大比例上是由突发/偶然作用(如冲击、爆炸、不可预见的活载等)引发的^[7]。在上述作用引发特大作用时,要求结构保持完整无损是不现实的;只能要求结构不致因此造成与其起因(初始损伤 D_1)不相称的破坏后果^[8]。突发/偶然作用在时

间、空间上是高度离散和不确定的,难以有效地分析或预防;鲁棒性是结构固有的性能,因此突发损伤后的风险防控可以从提高结构的鲁棒性入手。从理论上讲,就是要确保公式(2)中条件概率 $P(D_r | D_1)$ 和不相称破坏的后果 C_r 的乘积低至可接受。

2.2 提高结构鲁棒性的途径

经验表明,通过改善结构构造、连接,强化延性、连续性等可以在一定程度上抑制连续坍塌的发生和发展。以大板结构为例,通过从构造和设计方面改进,可以改善大板结构抵御连续坍塌的性能。这也为结构鲁棒性的提高提供了借鉴。

对于结构突发损伤风险防控,一个自然的思路是,在已有设计要求的基础上强化或改善结构的消能能力。结合本文第一部分,从四个方面讨论加强结构鲁棒性的相关措施:

(1) 通过改善构件延性等途径确保构件完全破坏之前的消能性能(这与可持续建设中要求尽可能减少能量/能源消耗是相反的)。

(2) 确保结构在突发损伤后具有冗余路径,避免过早出现妨碍外部作用所释放能量向结构消能转化的情况。

(3) 强调失效过程中结构关键部分与非关键部分的相互作用。由于结构超过弹性极限后的消能是以损伤为代价的过程,强化非结构部分的消能能力可以减轻结构关键部分的损伤程度。

(4) 设置附属消能装置来实现分灾功能,在结构控制中已有可借鉴的先例,例如采用被动消能装置^[9,10]来消纳外部能量(被动消能装置本身可以隶属于结构承载体系,也可作为非承载部件),借此减轻结构本身的消能压力,达到了减振、确保结构安全的目的。

3 总结

结构分析和设计一方面要考虑如何抵抗正常使用中的各种环境作用,一方面还要考虑如何有效减轻或控制结构突发损伤之后的破坏范围。结构鲁棒性要求结构在突发/偶然作用造成突发损伤情况下,不致引起与此损伤不相称的大范围破坏。

基于结构鲁棒性的能量解释,本文提出了一种改进的结构鲁棒性评价指标,表达为结构在特定要求的承载能力基础上的消能能力的无量纲形式。该

指标可以反映结构在损伤状态下的消能能力,也兼顾了结构的实际承载力水平。

结构鲁棒性是突发损伤风险防控的必然要求,对防灾减灾有重要意义。本文从单元(构件、节点)消能水平、冗余性能、结构关键部分与非关键部分的相互作用、引进附属消能装置四个方面讨论了加强结构鲁棒性的实际措施。

结构、环境、人构成了一个复杂的“人-事-物系统”^[9]。本文重点放在了“物系统”即结构本身。显然,从整体论上认识结构鲁棒性还需要从“人-事-物系统”的角度作进一步研究。

参考文献:

- [1] Schafer B W, Bajpai P. Stability degradation and redundancy in damaged structures [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27: 1642~1651.
- [2] The Standing Committee on Structural Safety (SCOSS). Structural safety 1997-99: review and recommendations 12th report of SCOSS [R]. London: SETO Ltd, 1999.
- [3] Carper K L. Current structural safety topics in North America [J]. *The Structural Engineer, IStructE*, 1998, 76(18): 233~239.
- [4] Portland Cement Association. Structural integrity requirements for concrete buildings [R]. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2006.
- [5] Ellingwood B R, Dusenberry D O. Building design for abnormal loads and progressive collapse [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2005, 20: 194~205.
- [6] Beeby A W. Safety of structures, and a new approach to robustness [J]. *The Structural Engineer, IStructE*, 1999, 77(4): 16~21.
- [7] Hadipriono F C. Analysis of events in recent structural failures [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1985, 111(7): 1468~1481.
- [8] 黄兴棣. 工程结构可靠性设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
Huang Xingdi. Reliability design of engineering structures [M]. Beijing: China Communications Press, 1989. (in Chinese)
- [9] 王光远. 工程软设计理论[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
Wang Guangyuan. Theory of soft design in engineering [M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
- [10] Soong T T, Dargush G F. Passive energy dissipation systems in structural engineering [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 1997.