

桥梁结构的鲁棒性

汤国栋¹ 王竹² 廖光明¹ 陈兵¹ 吴洪朗³

(1 四川大学建环学院 四川成都 61065 2 中咨(武汉)桥隧设计研究院有限公司 武汉 430056

3 四川路桥建设集团股份有限公司大桥分公司 成都 610041)

摘要:桥梁鲁棒性(robustness),即意外作用下结构整体的稳固性。其研究以避免垮塌为目标。桥梁抗震与灾害修复、拉索骤断毁桥等,均将涉及结构鲁棒性问题。在概述桥梁鲁棒性之后,讨论了实现桥梁鲁棒性的途径:如冗余技术、多路传力、提高延性等,以及基于鲁棒性理论的示例分析。

关键词:桥梁 鲁棒性 彻底关 破损安全

鲁棒性(robustness)即稳健性、强壮性、坚韧性,原为统计学术语,也应用于控制理论等。意为当系参数扰动时,仍能保持整体稳固性的能力。故亦称参数扰动不敏感性。

1 桥梁的鲁棒性

桥梁结构的功能,包括结构的安全性(safety),适用性(serviceability)和耐久性(durability),以及鲁棒性,(意外情况下的安全性)^[2]。

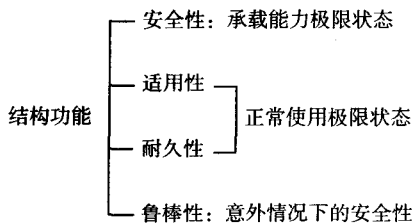


图1 结构功能

桥梁鲁棒性,为意外作用下抵抗整体垮塌的能力,亦即结构系统的稳固性;其破坏的后果与原因不对应(不相称)时的结构牢固性。

譬如,汶川地震后的彻底关大桥,因意外危岩孤石撞击,若仅伤及被撞局部、且可修复,是属常见;当因此而引起桥梁整体的垮塌^[4],则为‘因果不相称’,为结构鲁棒性问题,如图4。

又如,桥梁拉索骤断毁桥之类的意外事件,其‘局部’构件拉索的破断,却导致了预料之外的桥梁垮塌其因果不相称,是属桥梁鲁棒性问题。

桥梁的易损性(vulnerability),整体易于受损的性质,即局部的损毁导致结构整体的破坏,

为鲁棒性的反意概念^[2]。例如混凝土简支梁桥与连续钢桁梁相比,则相对于后者具有易损性,后者具有较强的鲁棒性。

关于此,目前的桥梁工程教育和训练中是欠缺的,对桥梁鲁棒性的认识和设计意识及能力不足,以致造成某些项目鲁棒性功能的缺失,尚未必有所意识;或者遇有意外垮塌时,仅视之为‘天灾’,而无能为力。

2 鲁棒性与安全性

结构安全性与鲁棒性,如图2所显示的:结构状态(D)与强度指标(S)的关系^[2]与特征。

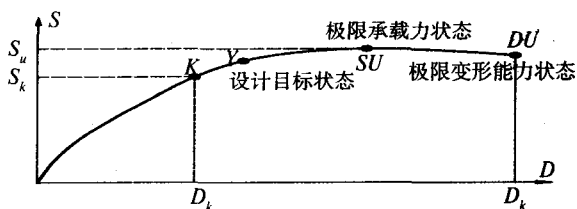


图2 结构状态

2.1 鲁棒性与安全性的目标不同

所谓结构安全性,基于极限承载力极限状态、以维持正常功能最低安全要求为其设计目标;而适用性与耐久性,为基于正常使用极限状态,维持正常服役功能;而结构的鲁棒性,则基于极限变形能力,以避免结构垮塌为目标,为结构安全性的上限(图2)。

譬如在公路防护(如防撞护栏)结构中,要求阻止撞击车辆发生落涯或撞毁之类的第二次事故目标,受撞护栏超越了一般意义的‘强度条件’;军用飞机结构,当意外发生时,要求首先

要求保护人(飞行员)、避免大面积损毁、避免技术丢失,结构的可修、快修性等,此即结构的鲁棒(robust)属性。油气、供水管道,则以不致爆管断流为目标,承认(不可免除的)管道意外受损而发生的渗漏、警示,力求避免爆管、便于尽速修复等等,为管道结构的鲁棒性问题。

2.2 鲁棒性与安全性的载荷不同

结构安全性设计为‘设计载荷’等作用下的设计;鲁棒性设计则为意外载荷或作用下的设计。二者载荷的性质、作用方式等均不相同。意外载荷往往具随意性,不可能建立标准,只能有条件地评估。结构鲁棒性研究,在于避免可能遭遇的意外垮塌,以确定合理的鲁棒性措施与设计。至于意外的荷载或作用,若超过了预期,结构垮塌了,就是“天灾”。换言之,与结构安全性设计一样,鲁棒性设计仍然存在‘失稳(健)’的概率。

2.3 鲁棒性设计与安全性设计

安全性设计多依重于设计规范、标准进行^[2, 6]。然而,一个完善的工程设计,应全面涵盖安全可靠性和的鲁棒性、整体与局部的协调功能等。

由上可知,桥梁鲁棒性首先着重于结构的整体,然后根据对结构总体的贡献,将其局部或组成构件,区分为关键的、重要的或一般的。

对于关键构件或关键部位,出于提高结构整体的抗垮塌性能,可在选材、结构体系、构造等方面,采取取措施。首先体现在概念设计及方案设计中;其次才是专门的结构鲁棒性工况的载荷、参数等的分析与设计。

震区桥梁设计,特别是概念设计、方案设计中,除遵守通常规范的准则外,尚需注重避免意外的、次生损毁导至的垮塌;缩小损毁范围,以及损坏后的可修复、快修复性,此即桥梁结构的鲁棒性。

桥梁的抗震及灾害修复工程,应当如建筑结构一样^[2, 11],进行结构鲁棒性设计:将涉及材料、结构体系、构造及设计、分析工况等。结构超越承载力极限状态的失效,并不一定意味着垮塌。因此安全性与鲁棒性,二者既相互关联而又

有所区别。

确定桥梁的极端(意外)事件及其极限状态,为鲁棒性设计的前提;可以是规划提出,亦可由业主以任务下达。所谓极端事件,包括:地震、风灾、洪水,船撞、车辆撞击等等。在此极限状态下,结构鲁棒性目标的实现,应是项目设计的任务之一。

3 增强结构鲁棒性的途径

增强结构鲁棒性,是结构工程师普遍的愿望,在灾害地区或灾害修复工程中,则将是明确的指标性要求。

增强结构鲁棒性的理论原则,散见于断裂力学^[7]、结构论著^[2]乃至桥梁设计规范^[5]中。现择要简述之。

3.1 结构超静定性的应用

规范^[5]之1.3.4条认为,‘如果没有迫不得已的相反理由,用应采…连续的结构’。由此可见,则中下承式拱桥道纵向采用连续结构方才合适。

亦可对关键构件与关键部位,增加其冗余度,提高其抗破坏能力或抗变形能力。

3.2 关键构件提高安全度

关键构件适当提高其安全度,以增加结构的鲁棒(稳健)性,提高抵抗总体垮塌的能力。从这一意义上讲,桥梁拉索为关键构件,其安全系数取 >2.50 或更大^[10],较一般构件的大,是合适的。

3.3 冗余技术

当结构中某一构件或结构部分,因损伤或破坏而完全退出工作后,其承担的荷载和作用,能由既存结构有效承担,以保持结构的整体功能。亦即结构具有多余(冗余)的传力路径,损伤失效了某些构件后,结构总体不致丧失承载功能。

为提高系统的鲁棒特性,必要时在系统中加入多余的元件,称此为冗余系统;增加多余元件提高可靠性的作法,称为冗余技术。

为此,文献[4]对于超静定结构和静定结构,基于结构可靠性界定为:

非超静定结构,其构件失效,将使结构失去稳定性(成为机构)导致垮塌,则结构是失效-临界的,为非超静定结构。通常受拉杆件(或拉

索)的失效-临界为断裂-临界。

超静定结构, 结构主要构件采用多路径传力(或连续结构)。其主要杆件失效不致引起结构垮塌尚存在冗余单元, 为超静定结构, 它是非失效-临界的。容易看出, 这与工程力学中, 以静力学方程可解为条件的静定性定义相关而又赋予了新的、结构理论的含义。文献[4]对于具有不同超静定性结构的强度极限提出了相关的设计参数; 从不同角度研究了实现结构超静定的措施。

在桥梁拉索系统中, 对于关键索件, 采用多路径传力, 设置安全备用索, 以实现有限破损尚且安全的预期, 作为排除断索垮桥危险的手段, 此即破损安全拉索(Failure Safety Cable=FSC)技术^[6], 当属结构鲁棒性问题的范畴。

3.4 提高结构的延性, 提高结构的延性

即提高结构的摄动能力、增大结构系统破坏的能量容量, 对提高结构的鲁棒性有重要意义。规范[5]第1.3.3条认为: “一座桥梁…在强度极限状态和极端事件极限状态下逐步显示出较大且可见的非弹性变形。可以假定, 在一个混凝土结构件中, 如一个连接的抗力, 不小于相邻构件非弹性作用, 施加在该连接上的最大力效应的1.3倍, 则它就可满足延性要求。消能装置可以作为提供延性的手段。”

3.5 多路径传力与桥梁拉索系统的鲁棒性

规范^[5]之1.3.4条, 还认为, 如果没有迫不得已的相反理由, 应采用多条传载路径…。桥梁拉索系统, 例如双吊杆(图3), 即为多路径传载。为增强其鲁棒性, 其作法是将位于一点的双吊杆, 取其一根承载, 而另一根不受力作为安全备用, 如图3右所示。则吊杆系统将不致因吊杆骤断而毁桥。这与断裂力学^[7]的破损安全技术是一致的。

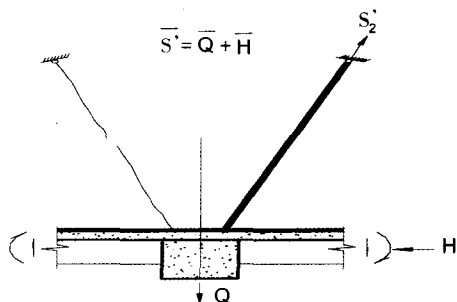
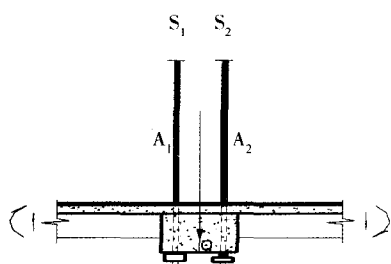


图3 桥梁拉索系统-双吊杆

文献[6、8]关于破损安全桥梁拉索的准则是: 拉索意外破损后, 桥梁不致损毁, 且便于修复拆换。亦即‘断丝不断索’或‘断索不毁桥’。也就是桥梁拉索系统鲁棒性研究之范畴。

4 灾害桥梁的垮塌与修复

地震、洪灾、泥石流、船舶撞击等灾害作用的不确定性, 导致桥梁损毁与修复存在再次失效乃至垮塌的风险。例如2008年的5.12汶川地震及其后的彻底关大桥的二次垮塌, 这属灾害风险, 而非过失, 发生第三灾害垮塌, 史上也曾有过。应当注意到鲁棒性设计的理论、方法、参数取值、材料选用等方面均与通常的安全设计相关, 而又有很大的差异。基于结构鲁棒性的抗震桥梁的研究, 是现实的和迫切的。

位于四川汶川地震灾区的彻底关大桥, 为通往灾区的生命线上的咽喉。

4.1 两次垮塌

2008年‘5.12’大地震后的一年多里, 经历了二次垮塌与二次修复。

第一次垮塌, 2008年5月12日, 大桥因震害损毁垮塌。经一年修复后通车。

第二次垮塌, 修复后的大桥, 在运营了74天后被余震滚石撞击, 再度垮塌: 重约200t, 自500m高处滚落下的孤石, 击中了3号桥墩, 致相邻二跨的桥道落梁垮塌。通往灾区重建的生命线, 213国道都汶段, 交通再次中断。

4.2 大桥的震害修复

大桥的二次损毁的修复方案。

第一次修复, 大桥原为双柱式桥墩、等跨筒支梁、混凝土结构。因地震第一次垮塌后, 在面临紧急救灾的当时, 重建的方案, 很自然地采取了‘恢复原状’的修复方案, 简单便易, 有利于

抢通。

第二次修复,滚石损毁了刚刚修复的大桥,再次修复时,基于前车之鉴,不再是简单地采用‘原样恢复’的方案。因系近岸边孔损毁,改用了大体积圬工填筑,形成重力式路堤,恢复通行(图5)。



图4 彻底关大桥震害修复后第2次垮塌



图5 彻底关大桥第2次垮塌后以路堤修复

4.3 二次垮塌与二次修复的思考

作为问题研究,亡羊补牢,可供思考的是:

其一,地震及其次生灾害难以预料,此类事件重现的可能,不能排除:在震区被视为生命线的关键构造物,第2次意外的垮塌发生了,第3次垮塌未必能绝对避免,一一在台湾就曾经发生过第3次损毁垮塌。这对桥梁者提出了课题。

其二,路堤代桥梁方案的合理性,第2次修复采用了路堤方案。其合理性恰在于:考虑了地震次生灾害的意外作用下,桥梁再次垮塌的可能,在保证桥下足够的通过能力后,用重力式圬工填土增强耐撞能力,在技术方案上力求抵抗意外事件,恰是桥梁结构鲁棒性设计所含盖的目标。

5 桥梁鲁棒性分析示例

西藏拉萨市柳梧大桥(图6),系参照Barcelona跨线桥之设计而构思的。从增强桥梁整体稳固性(鲁棒性)即抗震的需要,将原上承式二铰拱改为中承式无铰拱,跨径扩大为三倍。

现分析其鲁棒性特征:

- 桥跨为全钢结构,其延性较混凝土强;
- 四拱片组成、无铰拱体系;

● 外挑弧形人行道,其上斜吊杆使副拱无侧倾的横弯曲作用,使主副拱恒载下能独立‘站立’,无相互作用,以增强抗整体垮塌能力。据此计算取定副拱($\theta_a \approx 30^\circ$)及拉索($\theta_{max} \approx 38^\circ$)的倾角。

该桥实施时,由于未理解桥梁体系构思的意图,将上述倾角分别修改为 $\theta_a \approx 28.4^\circ$ 和 $\theta_{max} \approx 35^\circ$,造成副拱吊杆的不良后果。



图6 拉萨柳梧大桥

6 结语

桥梁鲁棒性问题,是一个涉及广泛的大题目,在概要阐述其基本要点后,试图探讨其在拉索骤断毁桥^[3]及震灾修复等的应用。以寻求意外破坏发生时,桥梁结构具有相对的整体稳固性、不致垮塌、有利于复修的技术途径。

显然,目前还只是对问题的阐述、诠释和初步的探讨。可以预料,未来这将是一个颇具挑战性的,新兴的课题。

参考文献

- [1] 黄琳. 稳定性与鲁棒性理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.2
- [2] 叶列平等. 论结构抗震的鲁棒性[J]. 建筑结构, 第38卷6期, 2008·8
- [3] 汤国栋等. 桥梁吊杆及拉索的健康诊断[J]. 公路, 2002
- [4] 吴洪朗等. 都汶路彻底关“321钢桥”应急抢险施工技术[J]. 西南公路2008.8
- [5] AASHTO 1994 美国公路桥梁设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998
- [6] 汤国栋, 陈宜言, 姜瑞娟等. 破损安全桥梁拉索及其系统研究[J]. 四川大学学报 工程科学版, 2007.6
- [7] D.Brock. 工程断裂力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1980
- [8] 汤国栋, 陈宜言, 姜瑞娟等. 拱式桥梁破损安全吊杆及其系统研究[J]. 四川大学学报 工程科学版, 2007.6
- [9] 小西一郎. 钢桥(2、4分册). 北京: 人民铁道出版社, 1980
- [10] 刘家珩. 从汶川大地震谈建筑的鲁棒性. 深圳水务咨询有限公司