

# 工程抗震韧性定量评估方法研究进展综述\*

毕熙荣<sup>1,2</sup>, 冀 昆<sup>1</sup>, 宗成才<sup>1</sup>, 任叶飞<sup>1</sup>, 温瑞智<sup>1♣</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 广西壮族自治区地震局, 广西 南宁 530022)

**摘要:**“韧性城乡”已成为我国防灾减灾领域的研究热点和未来指导方向, 韧性定量评估方法是保证其落地和应用的重要基础。首先结合国内外不同工程领域下的抗震韧性研究进展, 梳理总结了韧性评价的 7 个要素: 鲁棒性、可靠性、快速性、恢复时长、恢复程度、恢复策略和级联效应; 再将现有的韧性定量评估方法按照是否考虑不确定性分为两类, 每种方法还可根据是否考虑时间的影响分为静态和动态性能评估方法; 进而将现有的国内外面向不同工程对象的韧性量化评估方法进行了系统地分类和评价, 指出了各类评估方法的优缺点及适用范围。建议结合目前已经较为成熟的易损性、耐久性、地震风险区划的研究成果、系统特点和行为, 因地制宜地改进评估方法在具体工程中的应用。

**关键词:** 韧性城乡; 韧性量化评估; 工程韧性; 灾后恢复; 韧性评价

**中图分类号:** TU352

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2020)03-0417-14

## 0 引言

我国作为世界上自然灾害最为严重的国家之一, 随着经济社会发展和城市化进程的加快, 在保障地震灾后安全的基础上, 衡量现代城市乃至整个社会灾后维持或者恢复原有功能的“韧性”成为热门课题。“韧性”这一概念十分贴合我国现阶段的防灾减灾需求, 2017 年中国将“韧性城乡”列为“国家地震科技创新工程”四大计划之一, 也是“自然灾害防治九大工程”建设的重点指导方向, 对于提高我国城市抵御地震风险和灾后恢复能力, 保障国家重大战略的实施和人民生命财产安全具有重大意义。“韧性城乡”的落地离不开对韧性这一概念的量化评估, 这也是本文的重点研究方向。

抗震韧性的本质可以定义为降低地震风险、减轻地震破坏和缩短震后恢复时间的能力, 那么量化韧性的本质就是对性能恢复过程的评估。目前影响

最大、受众最广的韧性定量评估框架是 Bruneau 和 Reinhorn (2006) 提出的韧性三角形法, 此法常用于社区韧性的定量评估。一般认为韧性应该包括 4 个属性: 鲁棒性 (Robustness)、快速性 (Rapidly)、冗余性 (Redundancy) 和智慧性 (Resourceful), 即 4R 属性。各国学者结合具体工程问题在该研究基础上给出了不同的韧性量化评估方法。且现在的韧性度量方法发展体现了 2 个趋势: 从单一维度、单一系统向多维度、多系统耦合过渡; 从确定性的韧性度量方法逐渐向考虑概率意义的不确定性韧性度量方法发展。本文综合国内外韧性量化评估的相关研究成果, 在对韧性内涵梳理的基础上, 分别从确定性和不确定性 2 个角度对韧性量化评估方法进行综述, 并对我国韧性量化的现有研究进行展望并提出建议。

## 1 韧性量化评估要素

虽然韧性的基础概念框架大致相仿, 但依据

\* 收稿日期: 2020-02-06.

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2017YFC1500801)、国家自然科学基金 (51908518、51778589)、中国地震局工程力学研究所所长基金 (2019B09)、重点研发项目省级资金资助项目 (GX18C011) 和山东省高校土木结构防灾减灾协同创新中心基金 (XTZ201901) 联合资助。

**♣通讯作者:** 温瑞智 (1968-), 研究员, 博士生导师。主要从事工程地震与强震动观测技术研究。

E-mail: ruizhi@iem.ac.cn.

研究对象的不同，其定义也有所不同，这一特性贯穿到后续的韧性量化评估过程。韧性研究主要集中在 4 个领域：组织领域、经济领域、社会领域

和工程领域，部分学者对不同领域韧性内涵的定义见表 1。本文主要对工程领域的韧性内涵进行阐述。

表 1 不同领域中韧性定义  
Tab. 1 Definition of resilience in different fields

文献来源	研究领域	韧性内涵
Sheffi (2005)	组织领域	系统保持或恢复稳定状态的固有能力，从而使其在破坏性事件或持续压力下能够继续正常运营
Rose 和 Liao (2005)	经济领域	使企业和地区能最大限度避免损失的内在能力和适应能力
Rose (2009)	社会领域	预测风险、限制不利后果的能力，以及在面对动荡变化时生存、适应和迅速恢复的能力
Hollnagel 等 (2006)	工程领域	系统在出现干扰和不可预测的变化时调整其功能的内在能力
National Infrastructure Advisory Council (NIAC) (2009)	工程领域	预测、吸收、适应自然灾害等破坏性事件和快速恢复的能力
American Society of Mechanical Engineers (ASME) (2009)	工程领域	系统在不中断其功能的情况下承受外部和内部破坏的能力，或者系统功能中断后，可以快速完全恢复功能的能力
Hollnagel (2011)	工程领域	重点在于技术系统是如何正常运行及找出故障原因
Youn 等 (2011)	工程领域	系统的被动存活率（可靠性）与主动存活率（恢复）之和
Dinh 等 (2012)	工程领域	确定了增强工程韧性的六个因素：故障最小化、限制受损影响、行政控制程序、灵活性、可控性和早期检测

笔者对韧性的定义进行了重新提炼，认为后续的韧性量化评估应当从以下七个要素入手：

(1) 鲁棒性。系统在灾害情况下维持其性能以及抵御冲击的能力。有些韧性定义没有解释韧性实现的机制，许多研究将关注的重点放在系统如何“恢复”，而“吸收”和“适应”破坏性事件的能力也应该被认为是韧性的关键部分。

(2) 可靠性。破坏事件发生后瞬时系统性能的下降程度。韧性定义中的可靠性通常被认为是衡量其抵御破坏能力的一个重要特征，特别是针对工程系统。现有的韧性评估大多直接给出破坏后系统最低功能状态，而并未给出破坏时功能下降的过程。

(3) 快速性。系统遭受破坏后系统功能恢复的速率。值得注意的是此速率并不是单纯的线性或非线性增长，甚至不一定是增长，甚至有可能出现系统功能下降的情况。

(4) 恢复时长。当破坏事件发生后，系统性能水平开始下降到恢复到目标性能水平所需的时长。

(5) 恢复程度。不仅仅是恢复到灾害前性能水平才能说明系统有韧性，实际情况系统很可

能恢复后低于或者高于灾害前的状态。

(6) 恢复策略。针对不同系统、不同维度的韧性指标，统筹安排作为修复资源的人力、经济和社会等成本，以实现系统性能修复效率的最大化。不同系统、不同对象的修复策略是不同的；不仅要考虑备灾前准备情况，也要考虑恢复（灾后活动）的作用。

(7) 级联效应。一个维度（系统的某些属性）发生破坏后，会导致其它维度或者系统的破坏，恢复时各个维度、系统之间也相互影响。一个系统的韧性在现实中往往取决于其它系统或者子系统之间的破坏程度和功能的互相依赖程度。现有的韧性研究较少涉及到系统内和系统间的级联效应。

上述七要素之间互相影响，其在韧性的 4 个领域的关系如图 1 所示。其中鲁棒性、快速性和可靠性既影响组织领域又影响工程领域；恢复程度影响组织和经济领域；恢复时长影响经济和社会领域；级联效应和恢复策略则影响工程和社会领域。七要素对韧性 4 个领域的影响既有交叉又有重叠，这是因为七要素之间存在着内在联系，它们互相影响、互相作用，共同组成了系统的韧性。如鲁

棒性、可靠性决定了恢复程度；快速性和恢复策略决定了恢复时长；级联效应影响了恢复策略；而恢复时长也影响着恢复程度；决策者也会根据恢复程度和恢复时长及时调整恢复策略。

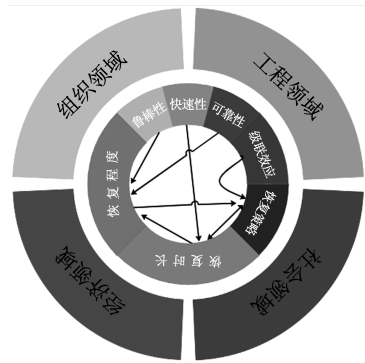


图 1 韧性评价的七要素

Fig. 1 Seven factors of resilience assessment

## 2 韧性定量评估方法

本文选取目前较具代表性韧性定量评估方法列于表 2，并概述了这些方法与本文提出的韧性七要素之间的关联。由表 2 可见，恢复时长是最常出现在韧性定量评估中的一个指标，这是由于恢复时间是灾后韧性最直观量化的指标，也是韧性最直接的概念外延；鲁棒性、可靠性、快速性和恢复程度均有 4 种方法涉及到，是较常用的评估指标；恢复策略只被 2 种方法提及，说明现阶段韧性定量评估方法多处于依靠系统自身恢复能力，或者恢复策略这一指标难以加入韧性定量评估公式中；由于目前单个系统的定量评估研究仍在起步阶段，所以级联效应仍鲜少出现在定量评估指标中。基于韧性七要素对现有定量评估方法进行分析，得出目前韧性定量

表 2 韧性定量评估方法

Tab. 2 Methods for quantitative assessment of resilience

编号	来源	方法	特点/应用	是否涉及韧性七要素						
				鲁棒性	可靠性	快速性	恢复时长	恢复策略	恢复程度	级联效应
1	Bruneau 等 (2003)	韧性三角形模型	—	√	—	√	√	—	—	—
2	Zobel 和 Khansa (2014)	改进型韧性度量法	单个突发事件 - 多个连续破坏性事件	√	—	—	√	—	—	—
3	Henry, Ramirez - Marquez (2012)	时间指标韧性度量法	计算了系统恢复后的总成本和恢复行动的实施成本	√	√	—	√	—	—	—
4	Rose (2007)	确定性静态度量法	交通系统	—	—	—	—	—	√	—
5	Rose (2007)	确定性动态度量法	—	—	—	—	√	—	√	—
6	Francis 和 Bekera (2014)	动态韧性度量法	—	√	—	√	√	—	—	—
7	Wang (2014)	信息系统韧性度量法	企业信息系统	—	—	√	√	—	—	—
8	Orwin 和 Wardle (2004)	瞬时韧性度量法	管网	—	√	—	—	—	—	—
9	Cimellaro (2010)	服务质量韧性度量法	医疗保健	—	—	—	√	—	—	—
10	Chen 和 Miller - Hooks (2012)	交通网络韧性度量法	机场航班准点率	—	—	—	√	—	—	—
11	Enjalbert (2011)	局部整体韧性度量法	航空运输系统	—	—	—	—	—	—	—
12	Chang 和 Shinozuka (2004)	概率性韧性度量法	地震后重大工程和社区	—	√	—	√	—	—	—
13	Youn (2011)	改进型概率性韧性度量法	缓解策略和应急策略	—	—	—	—	√	√	—
14	Ouyang 等 (2012)	多灾害韧性度量法	适用不同类型的中断	—	—	—	√	—	—	—
15	Franchin 和 Cavalieri (2015)	空间分布韧性度量法	地震后重大工程：公路网、供水、电力系统	—	—	√	—	—	√	—
16	Ayyub (2014)	随机性指标度量法	—	—	√	—	√	—	—	—
17	Hashimoto 等 (1982)	理想韧性度量法	—	—	—	—	—	—	—	—
18	Pant 等 (2014a)	随机韧性度量法	—	—	—	—	√	√	—	—

评估面临的主要困难有以下几点：第一，韧性指标的选取没有统一标准；第二，各指标的权重系数主观性较强，一般依靠专家评估法评定；第三，各个具体工程或系统有不同的特点和需求，性能评定标准也不一样，例如供水系统的韧性定量评估方法就不适用于供电等管网系统，同样是管网系统的燃气和供水，其韧性评估方法也有差异。

在目前的韧性评价体系中，涉及级联效应的较少。但随着系统功能的复杂化和多样化，各系统间以及系统内部各子系统间的相互关联性（耦合）愈发紧密。在生命线系统中，韧性评价指标中有必要考虑级联效应，即考虑子系统以及不同系统间的相互依赖性，可以根据相互依赖性评估基础设施韧性指数，分配给每个基础设施用来评价韧性指数的权重是由对恢复措施产生影响大小来确定的。

考虑级联效应的优点在于能够识别关键的生命线，不会因为主观判断出现偏差。然而，当时间序列包括耦合事件时，耦合效应会对在交叉相关系数的评估中产生失真。级联效应的加入可以建立基础设施之间的相互依赖关系，该方法能够评估最优恢复计划，最大限度地提高基础设施的韧性指数，减少恢复时间，还考虑了物理、社会和经济维度的约束。国外有部分学者在研究韧性时注意到了级联效应对韧性的影响，如 Ash 和 Newth (2006) 优化复杂的大规模网络，使其具有抵御级联故障的韧性。级联故障在电力传输、通信和交通网络中很常见，通常因为网络节点过载导致故障而触发，其影响在网络中是非线性传播的，甚至可能导致网络关闭。在复杂的相互依赖的网络工程中，许多学者对级联失效行为的研究已进行了大量的工作 (Whitson, Ramirez - Marquez, 2009; Hernandez - Fajardo, Dueñas - Osorio, 2013; Koc *et al.*, 2013; Su *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014; Vugrin *et al.*, 2014)。如 Ash 和 Newth (2006) 首先对联级失效进行建模，然后根据网络拓扑指数（包括共同近邻、模块性和协调性）的概念开发了故障韧性网络，认识到工程系统之间的相互依赖关系对规划其运作至关重要 (Rinaldi *et al.*, 2001)。交通、电力和电信等重大工程之间存在着高度耦合的关系。一个系统的韧性可以影响其它系统的韧性。建立具有级联效应的重大工程模型 (Holden *et al.*, 2013) 的一个重要内容是研究其韧性耦合关系 (Ouyang *et al.*, 2009)。除了各

个系统间的级联效应，同一个系统的不同属性维度之间的级联效应也应被重视，目前韧性研究尚停留在同一体系的单一维度。

现有的韧性定量评估方法按照是否考虑不确定性可以分为 2 类。考虑不确定性的方法是考虑系统行为相关各事件或要素的随机性或者发生概率，而确定性定量评估的各个度量标准都是确定的。每种度量方法还可以根据是否考虑时间的影响进行分类，基于静态性能的方法不考虑时间对韧性度量的影响，而基于动态性能的方法解释了韧性受时间的影响。下面将从是否考虑不确定性的角度对韧性进行度量，逐一阐述每种韧性定量评估方法。

## 2.1 确定性韧性度量方法

性能影响函数法 (Performance response function method, PRF) 是发展较早、应用范围较广泛的一种韧性定量评估方法，是最早应用到工程领域的定量评估方法之一，该方法的优点是能同时融合系统破坏程度和恢复时间等指标。采用 PRF 方法首先要根据韧性定义选取评价指标 (赵旭东等, 2016, 2017)，其次给出工程系统在地震作用下的韧性评价指标和性能恢复曲线，如图 2 所示。韧性恢复函数常见的有 3 种类型：直线型、指数型和三角函数型。

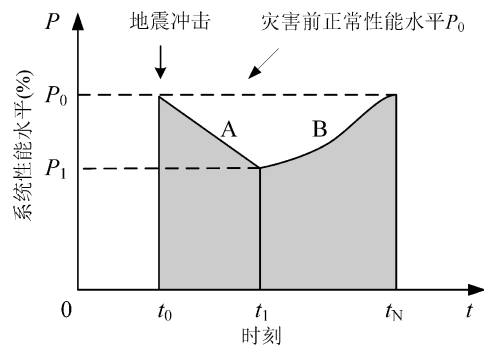


图 2 地震后性能恢复曲线

Fig. 2 Post-earthquake performance recovery curve

图 2 中  $P_0 - P_1$  为鲁棒性， $B$  曲线斜率为快速性， $P_1$  为破坏程度， $t_N - t_1$  为恢复时间。使用 PRF 法进行工程韧性定量研究的韧性公式为：

$$R = A_F/A_N = \int_{t_0}^{t_N} F(t) dt / \int_{t_0}^{t_N} N(t) dt \quad (1)$$

式中： $F(t)$  为目标体系在地震后的性能响应函数； $N(t)$  为目标体系正常运行时的性能响应函数，一般

做常数化处理。更多关于 PRF 方法的介绍和应用, 见 Abimbola 和 Khan (2019) 以及 Robert (2019) 的研究。

### 2.1.1 韧性三角形度量法

Bruneau 等 (2003) 在韧性三角形模型中定义了韧性的 4 个属性: (1) 鲁棒性, 即系统的强度, 或在发生破坏性事件时防止系统损坏的能力; (2) 快速性, 系统中断后恢复到其原始状态或至少恢复到可正常运行的速度或速率; (3) 智慧性, 在紧急情况下调动所需资源和服务的能力; (4) 冗余度, 系统将中断的可能性和影响降到最低的程度。在此基础上, 他们提出了一个确定性静态指标  $RL$ , 用于测量社区对震后韧性损失:

$$RL = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (2)$$

式中:  $t_0$  为系统中断发生的时间;  $t_1$  为社区恢复到正常中断前状态的时间;  $Q(t)$  为社区重大工程在  $t$  时刻的性能指标。

在该方法中, 将退化的内部结构性能与目标系统性能 (100%) 进行比较。如图 3 所示, 阴影区面积即  $RL$ ,  $RL$  值越大表示韧性越低,  $RL$  值越低表示韧性越高。该方法的优点是具有较广的适用性和使用范围, 因为  $Q(t)$  具有普适性, 不仅可以用于计算地震后重大工程的韧性, 还可以扩展到许多系统。但该模型仍有不足, Bruneau 等 (2003) 提出的指标假设社区重大工程的性能在地震前是 100%, 这通常与实际情况相悖; 即使无量纲化处理重大工程性能, 与  $RL$  相关的区域面积

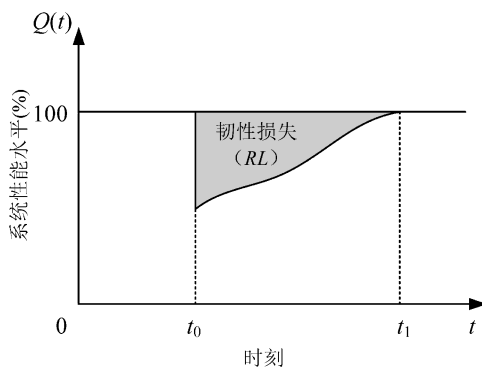


图3 韧性三角形度量法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of resilience triangle measurement method

也可能是决策者难以量化的一个度量标准; 且必须假定破坏性事件只具有瞬时影响, 恢复工作是破坏发生后立即开始等。

韧性三角形度量法是韧性研究中较早被广泛认可的韧性评估方法, 可应用于多种场景 (Adams *et al*, 2012; Sahebjamnia *et al*, 2015), 多数定量评估方法都是由此方法演变来的。Zobel 和 Khansa (2014) 以此方法为基础, 提出了韧性改进型度量方法, 计算某一适当时间间隔  $T^*$  内系统总损失的百分比:

$$R(X, T) = \frac{T^* - XT/2}{T^*} \times 100\% = (1 - \frac{TX}{2T^*}) \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $X \in [0, 1]$  为系统中断后功能损失的百分比;  $T \in [0, T^*]$  为完全恢复所需的时间;  $T^*$  为确定功能损失程度所需的适当时间间隔。其中分子表示到时间  $t$  时恢复的情况, 而分母表示由于中断事件  $e^j$  而造成的总损失。该方法可以通过  $X$  和  $T$  的组合得到系统性能指标, 相比于传统的韧性三角形方法, 该方法可以通过设定功能损失和恢复时间之间的关系式, 实现韧性恢复过程的“可视化”。

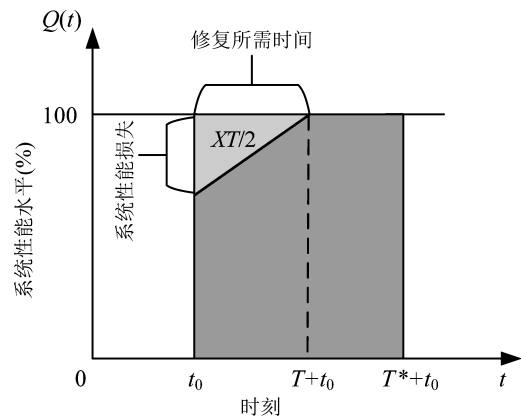


图4 改进型韧性度量方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of improved resilience measurement method

图4中, 单个突发事件的总损失可以用三角形面积 ( $XT/2$ ) 来表示。Zobel 和 Khansa (2014) 扩展了式 (3) 的适用范围, 用以度量多个连续破坏性事件的恢复过程。该度量方法的优点是具有较高的简便性, 但其恢复形式呈线性变化, 对一些系统不适用。当发生破坏时系统性能的下降是瞬时的, 这对于一些系统是正确的, 但是随着时

间的推移,一些系统的性能可能会继续出现更缓慢的下降。

为了解决该问题, Henry 和 Ramirez – Marquez (2012) 在 Bruneau 等 (2003) 韧性三角形度量法基础上提出了一个与时间相关的韧性指标, 将韧性量化为恢复与损失的比率, 即假定系统在某一时刻的性能水平用性能函数  $\varphi(t)$  度量。图 5 展示了 3 种对量化韧性很重要的系统状态: ①稳定的初始状态, 代表系统中断发生之前的正常功能水平, 开始时间  $t_0$  和结束时间  $t_e$ ; ②中断状态, 这是由  $t_e$  时刻的一个破坏性事件 ( $e^j$ ) 引起的, 它的影响一直持续到  $t_d$  时刻, 描述了  $t_d \sim t_s$  系统的性能; ③稳定恢复状态, 即在  $t_s$  时刻, 恢复操作已经结束。韧性的重要属性如图 5 所示, 包括可靠性 (系统中断前维持正常运行的能力)、易损性 (在  $e^j$  事件后, 系统能够避免最初的影响) 和可恢复性 (系统从  $e^j$  事件中及时恢复的能力)。

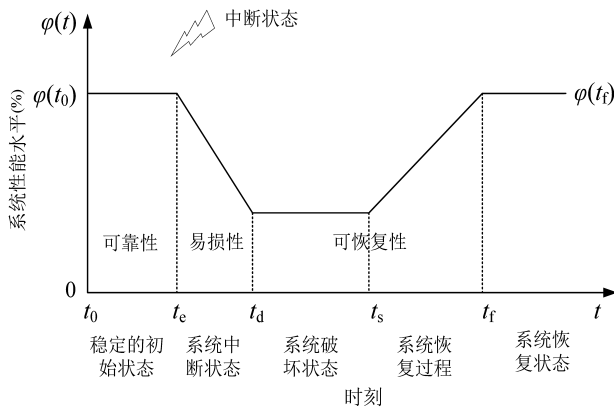


图 5 时间指标法韧性度量法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of resilience measurement by time index method

上述方法默认灾害发生后系统性能下降是瞬时的, 而实际上灾害发生后系统性能下降是一个过程, 即图 5 中  $t_e$  到  $t_d$  的过程。Whitson 和 Ramirez – Marquez (2009) 指出韧性行为  $\mathcal{R}(t | e^j)$  是事件  $e^j$  的一个功能函数:

$$\mathcal{R}(t | e^j) = \frac{\varphi(t | e^j) - \varphi(t_d | e^j)}{\varphi(t_0) - \varphi(t_d | e^j)} \quad (4)$$

式中: 分子表示到时间  $t$  时恢复的情况, 分母表示由于中断事件  $e^j$  而造成的总损失。

Henry 和 Ramirez – Marquez (2012) 在式 (4)

中韧性测量和规划的基础上, 开发了有关系统状态转换的韧性测量方法 (Barker *et al*, 2013; Pant *et al*, 2014; Baroud *et al*, 2014a, b)。

为了将韧性与瞬时最大扰动联系起来, Orwin 和 Wardle (2004) 引入了一个测量指标:

$$\text{Resilience} = \left( \frac{2 \times |E_{\max}|}{|E_{\max}| + |E_1|} \right) - 1 \quad (5)$$

式中:  $E_{\max}$  为不扰动系统功能的最大可吸收力强度;  $E_j$  为扰动对  $T_j$  时刻安全的影响大小。  $T_j$  时刻的瞬时韧性值可以取 0 ~ 1, 其中值为 1 时表示系统的最大韧性。当扰动冲击完全恢复时 ( $E = 0$ ), 可获得最大韧性。但该方法没有考虑恢复程度和恢复时间, 所以可能导致具有不同恢复时间的 2 个系统得到相同的韧性值, 这一现象与实际预期相悖; 且该方法无法进行系统的动态恢复分析。

## 2.1.2 静态和动态度量法

Rose (2007) 定义韧性为 “一个实体或系统在发生中断时维持系统功能的能力”, 该韧性定义的度量指标为在破坏发生时系统输出中避免的下降量与系统输出中可能出现的最大下降量的比值, 即:

$$R = \frac{\% \Delta Y^{\max} - \% \Delta Y}{\% \Delta Y^{\max}} \quad (6)$$

式 (6) 中提出的指标划分为确定性静态模型。如图 6 所示, 其中  $\% \Delta DY$  为非中断和预期中断系统

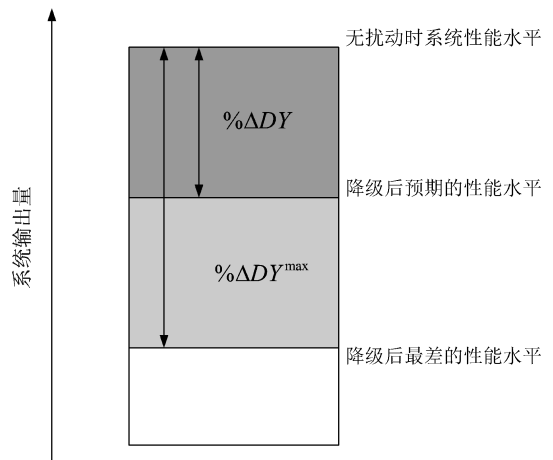


图 6 确定性静态韧性度量法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of deterministic static resilience measurement method

性能的差值； $\% \Delta DY^{\max}$  为非中断和最坏情况下中断系统性能的差值。但该方法较难估计出预期性能下降水平，特别是对于未知的中断，因为未知中断的深度、宽度和强度可能无法精确地被估计。Cox 等（2011）使用了类似的指标来计算伦敦交通系统的韧性，其中最坏的情况指标是指突发事件发生后乘客旅程的最大减少量。此方法突破了韧性三角形这一基础模式的模式，忽略了时间对韧性的影响，从而简化了韧性公式。

为了考虑动态韧性定义中对恢复时间的依赖性，Rose（2007）建议通过加速修复和重建成本以获得动态韧性，使投资成为动态韧性公式的重要输入：

$$DR = \sum_{i=1}^N [SO_{HR}(t_j) - SQ_{WR}(t_i)] \quad (7)$$

式中：测量值  $DR$  是  $SO_{HR}$  的函数，即系统在加速恢复时的输出； $SO_{WR}$  为系统在不加速恢复时的输出； $t_i$  为恢复过程中的第  $i$  个时间步长； $N$  为总时间步长数。函数  $DR$  如图 7 所示。

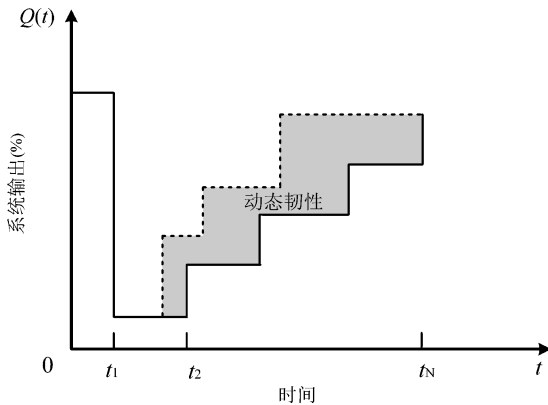


图 7 确定性动态韧性度量法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of deterministic dynamic resilience measurement

Francis 和 Bekera（2014）提出了指数型恢复速度形式的动态韧性指标：

$$\rho_i = S_p \frac{F_r F_d}{F_0 F_0} \quad (8)$$

$$S_p = \begin{cases} (t_8/t_r^*) \exp[-a(t_r - t_r^*)] & (t_r \geq t_r^*) \\ (t_8/t_r^*) & (t_r < t_r^*) \end{cases} \quad (9)$$

式中：事件  $i$  的对应条件为： $S_p$  为恢复速度； $F_0$  是指系统在初始状态下的性能水平； $F_r$  为恢复后达到新的稳定状态的性能水平； $F_d$  为中断发生后的性能水平； $t_8$  表示灾难后用于恢复的可接受的最大时间量； $t_r$  表示最终恢复的时间或达到新平衡状态的时间； $t_r^*$  表示完成时间、初始恢复动作，以及表示控制韧性“衰减”的参数，直到达到新的平衡。 $\rho_i$  根据新稳态功能之后所维持的原始稳态功能的比值  $F_r/F_0$  来描述吸收能力。但这个度量范围不受  $[0, 1]$  的约束，因此很难计算出极值，进而控制韧性改善的指数增长函数可能并不总是代表系统行为。笔者认为  $F_d/F_0$  代表系统在不采取恢复措施的情况下吸收冲击的能力， $F_r/F_0$  代表破坏后采取的灾后活动相关的适应性能力。可更有效地制定适应能力，以反映系统恢复最初未被吸收能力吸收的损失性能水平的能力。对于自适应容量比，恢复后的性能水平  $F_r$  可以用初始性能水平  $F_0$  与中断后的性能水平  $F_d$  之间的差值进行比较，即  $F_r/(F_0 - F_d)$ 。

## 2.2 考虑不确定性的韧性度量方法

### 2.2.1 概率性韧性度量法

概率性韧性度量方法主要是通过引入概率运算，将系统功能损坏和恢复转化成概率问题，从而更准确地度量韧性。

Chang 和 Shinozuka（2004）通过条件概率评估韧性，该方法通过引入性能损失和恢复时间来衡量韧性优劣。本文将韧性定义为系统在发生中断后初始性能损失小于最大可接受性能损失和完全恢复时间小于最大可接受中断时间的概率：

$$R = P(A | i) = P(r_0 < r^* \text{ 且 } t_0 < t^*) \quad (10)$$

式中： $A$  表示集合的性能标准； $r^*$  为系统性能的最大可接受损失； $t^*$  为中断的最大可接受恢复时间。Chang 和 Shinozuka（2004）应用此方法测量地震后重大工程 and 社区的韧性，其优点是可以应用于任意系统并体现出韧性量化中的不确定性。

Youn 等（2011）将韧性指标分成 2 部分：破坏后的被动生存率  $R$ （可靠性）和主动生存率  $\rho$ （恢复），分别对应了系统缓解受灾被破坏能力和应急恢复策略：

$$\Psi(\text{Resilience}) = R(\text{reliability}) + \rho(\text{restoration}) \quad (11)$$

韧性计算公式为:

$$\rho = P(E_{mr} | E_{cp} E_{cd} E_{sf}) \times P(E_{cp} | E_{cd} E_{sf}) \times P(E_{cd} | E_{sf}) \times P(E_{sf}) \quad (12)$$

式中: 韧性定义中的可靠性恢复的程度, 包含了系统故障事件  $E_{sf}$ 、正确诊断事件  $E_{cd}$ 、正确预后事件  $E_{cp}$  和成功恢复动作事件  $E_{mr}$  的联合概率。

式 (12) 包含了可靠性条件, 即防止破坏发生的预防措施作为量化韧性的一个组成部分, 而其它韧性评估指标大多为一个包含初始影响水平和恢复时间的函数。值得注意的是, 这个度量是以  $[0, 1]$  为界的。当恢复过程没有发生时, 取 0, 当系统完全恢复时, 取其上限值 1。该韧性公式的优势在于考虑灾前和灾后活动, 恢复过程与时间无关, 因此不需考虑恢复的时长。由于此方法包含了可靠性, 这种度量方式更适用于测量工程系统的韧性, 因为通过故障测试研究可以更有效地计算工程系统的可靠性。其局限性是条件概率的计算较复杂, 特别是当第一次发生中断时, 用专家评估法计算条件概率容易受主观影响, 从而导致韧性估计出现偏差。

### 2.2.2 多灾害韧性度量法

Ouyang 等 (2012) 提出了一种度量多灾害事件下“年度韧性”度量方法:

$$AR = E \left[ \frac{\int_0^T P(t) dt}{\int_0^T TP(t) dt} \right] = E \left[ \frac{\int_0^T TP(t) dt - \sum_{n=1}^{N(T)} AIA_n(t_n)}{\int_0^T TP(t) dt} \right] \quad (13)$$

式中:  $AR$  是一个随机度量, 因为  $P(t)$  是基于一个随机过程建模;  $TP(t)$  可以表示为一个随机过程或某个确定性函数;  $N(T)$  为  $T$  期间发生的事件总数, 可以包含多种危害  $\sum_{n=1}^{N(T)} AIA_n(t_n)$  项, 其中  $n$  为第  $n$  次事件,  $t_n$  为描述第  $n$  次事件发生时间的随机变量,  $AIA_n(t_n)$  为第  $n$  次事件的  $P(t)$  和  $TP(t)$  之间的面积。

该方法的主要度量标准是实际性能曲线  $P(t)$  和时间轴  $t$  之间的面积与目标性能曲线  $TP(t)$  和时

间轴之间的面积 (将恢复时间设定为一年) 的平均比率。该方法考虑了不同类型的中断情况, 更适用于实际应用, 优点是将目标性能曲线模型化为随机过程, 从而引入不确定性。

### 2.2.3 空间分布韧性度量法

Franchin 和 Cavalieri (2015) 提出了一种评估地震中供电, 供水, 交通路网等具有空间分布特征的工程韧性概率指标, 其对韧性的定义是基于重大工程网络空间分布的效率, 重大工程网络中 2 个节点的效率与最短距离成反比。韧性指标为:

$$F = \frac{1}{P_D E_D} \int_0^{P_D} E(P_r) dP_r \quad (14)$$

式中:  $P_D$  为无法居住的人口比例;  $E_D$  为地震前城市网络的功效;  $P_r$  为恢复进度的测度;  $E(P_r)$  为流离失所人口比例的恢复曲线。在上述研究中, 城市道路网的效率是用人口密度来衡量的。

由于  $P_D$  的随机性, 该韧性指标度量是概率性的, 由于使用  $P_D$  和  $E_D$  进行归一化, 因此韧性值被限制在  $0 \sim 1$ 。这个指标的优点是不仅可以评估公路网的韧性, 在合适效率函数条件下, 该指标还适用于其他重大工程, 如电力和供水网络等, 并且可以采用动态模型对  $P_D$  进行建模。

### 2.2.4 其它随机韧性度量法

Ayyub (2014) 定义了一个随机韧性指标, 将韧性定义为系统强度与系统负载之间的差值。该度量考虑了老化对系统的影响, 强调了鲁棒性和智慧性是韧性的 2 个维度:

$$R_e = \frac{T_i + F \Delta T_f + R \Delta T_r}{T_i + \Delta T_f + \Delta T_r} \quad (15)$$

式中:  $R_e$  为韧性;  $T_i$  为事故发生时间;  $T_f$  为故障发生时间;  $T_r$  为恢复时间;  $\Delta T_f = T_f - T_i$ , 为故障持续时间;  $\Delta T_r = T_r - T_f$ , 为恢复持续时间; 故障剖面  $F$  是鲁棒性和冗余度的度量, 用于易损性、韧性和失效的度量:

$$F = \frac{\int_{t_f}^{t_r} f dt}{\int_{t_f}^{t_r} Q dt} \quad (16)$$

同理, 恢复剖面  $R$  的几个示例轨迹取决于凸性或凹性恢复:



$$R = \frac{\int_{t_f}^{t_r} r dt}{\int_{t_f}^{t_r} Q dt} \quad (17)$$

Ayyub (2014) 提出的指标系统性能与图 4 相似, 但描述出具有特定含义的显示脆弱性和可恢复性轨迹, 强调了老化对系统的影响。

需要注意的是, 失效时间  $T_f$  的特征是其概率密度函数, 它是可靠性函数导数的负值。该指标的优点是包含了缓解 (可靠性) 和应急 (恢复期) 策略, 是最全面的恢复措施之一。Ayyub (2014) 引入故障剖面  $F$  和恢复剖面  $R$ , 模拟了鲁棒性与冗余性之比以及资源性与快速性之比。

通过定义理想状态的条件发生概率, Hashimoto 等 (1982) 提出了理想状态韧性概率度量法。即在  $t$  时间段内, 一个系统在给定一个故障状态下, 理想状态发生的条件概率为:

$$R = P\{S(t+1) \in NF \mid S(t) \in F\} \quad (18)$$

式中:  $S(t)$  为系统在  $t$  时刻的状态;  $NF$  和  $F$  分别表示非故障状态和故障状态, 非故障状态特指理想状态及不存在失效时的状态。

Attoh - Okine 等 (2009) 使用信念函数或论证理论量化系统韧性值, 这是使用不精确概率的主观概率贝叶斯理论的推广。离散信念函数被用来计算系统的韧性, 该方法适用于具有高度依赖性的系统。Barker 等 (2013) 提出了基于随机韧性的组件重要性度量 (Component importance measures, CIMs), 是用于衡量网络韧性的主要指标。该方法包括 2 种度量指标, 建模主要针对网络中断后的易损性和可恢复性: 第一个 CIM 类似于工程领域中风险降低值的重要性度量, 它量化了归属于每个网络组件的恢复时间比例; 第二个基于恢复能力的 CIM 等价于可靠性度量, 即当特定的网络组件是不可破坏的, 量化网络韧性是如何提高的。

### 3 国外韧性量化评估模型

除了上文介绍的韧性量化评估模型外, 各国学者研究了一些工程韧性量化模型。本文根据模型的原理及应用将模型分为 3 类: 模糊逻辑模型、

仿真模型和优化模型。各个模型有其适用范围, 可以根据需求进行选择。

模糊逻辑模型是基于概率性韧性定量评估方法衍生出来的, 主要根据概率学计算韧性, 它的优点是在样本足够多时计算结果更贴近系统真实性能, 其局限性是并不能完全反映系统的真实性能, 不适用于单体系统。因此模糊逻辑模型多用于综合类工程的韧性评估, 如 Muller (2012) 提出了一种用于评估关键重大工程韧性的模糊体系结构; Azadeh 等 (2014) 通过模糊认知图 (fuzzy cognitive map, FCM) 对工程韧性的影响因素进行了评价。

仿真模型模拟了系统的性能, 很多时候韧性的评价并不能将系统的实际运行机理量化, 而仿真模型可以对系统性能进行仿真, 其局限性是适用范围窄, 并不是每个系统都有适合的仿真模型。此方法的优点是系统遭受的破坏不限于自然灾害, 人为灾害同样适用, 如 Albores 和 Shaw (2008) 提出了一个离散事件模拟模型来评估消防救援部门在恐怖袭击发生时的准备情况; Jain 和 Bhunya (2010) 采用蒙特卡罗模拟方法研究水库的韧性; Sterbenz 等 (2010) 提出了一种基于集成分析仿真、拓扑生成和专家心理仿真的方法来提高网络的韧性; Adjetey - Bahun 等 (2016) 采用时间依赖的仿真模型来衡量铁路运输系统的韧性指标。

优化模型是在前 2 种模型的基础上改进而成, 它的优点是不仅具有量化的功能, 还具有优化系统韧性的功能, 即在计算系统韧性的同时给出优化策略。优化模型的针对性较强, 其评估对象比前 2 种模型更为具体, 如 Faturechi 等 (2014) 提出了一种评估和优化机场韧性的数学模型。Azadeh 等 (2014) 利用数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 研究了石油化工企业韧性; Faturechi 和 Miller - Hooks (2014b) 提出了一个多目标三阶段随机数学模型来量化和优化路网中的出行时间韧性; Jin 等 (2014) 建立了一个 2 阶段随机规划模型来分析城市公共交通网络的韧性; Baroud 等 (2014a) 采用 Barker 等 (2013) 提出的 2 种基于随机韧性的构件重要性度量 (CIM) 对航道网络的脆弱性和可恢复性进行量化。优化模型也可以应用于综合类的工程, 如 Khaled 等 (2015) 提出了评价铁路关键基础设施的数学模型; Vugrin 等

(2014) 提出了交通网络韧性的多目标优化模型; Alderson 等 (2014) 提出了一种混合整数非线性规划 (mixed integer non-linear programming, MIN-LP) 来量化关键重大工程的运行韧性。

## 4 国内韧性量化评估方法

对于“韧性城乡”概念,我国已有许多学者做了系统梳理和总结。陆新征等 (2017) 指出建设韧性城乡的主要挑战与关注问题;翟长海等 (2018) 阐明了城市抗震韧性的定义,系统总结了城市抗震韧性评估的国内外研究现状,并提出了建设抗震韧性城市所涉及到的科学技术问题及韧性能力提升策略。具体到韧性量化评估框架,吴吉东等 (2013) 基于复杂系统理论,从“均衡角度”定义了灾害恢复概念,建立了定量度量框架;孟令军等 (2016) 基于 RATA 韧性评价体系对天津市某社区进行韧性评价;郭小东等 (2016a) 将社区可恢复力与社区灾害的易损性比值作为韧性衡量标准,构建社区韧性评价模型;郭小东等 (2016b) 对韧性城市的韧性内涵进行了研究,并建立了城市防灾韧性能力的定量评估方法。对于城市基础设施韧性,李亚等 (2016) 梳理总结了基础设施韧性研究框架与定量评估方法;陈宣先和王培茗 (2018) 对韧性城市的体系也进行了总结,并指出韧性城市研究在区域宏观层面已初见成效,但在城市中观和微观层面略显不足;周侃等 (2019) 将韧性量化评估方式延展到经济维度,以汶川地震为例做了恢复效率评价。上述研究将城市或社区看成一个整体,建立的定量评估方法主要基于宏观的韧性城市或韧性城乡,能够对一个城市评估大范围的灾后恢复效率,减小人员财产损失提供参考。

一个宏观城市或社区的功能恢复本质是大量子系统的恢复。判断其在一个局部破坏下的恢复状态,建立适用于特性工程系统、具体破坏状态下的灾后恢复模型和定量评估方法,能够得到更准确的判断依据和恢复力模型,这对于灾后快速恢复以及资源调度规划具有重要的实践价值。现阶段,已有学者对城市基础设施管网系统(电力,供水,燃气,交通等)和工程结构(桥梁,建筑等)等方面的恢复状态进行了研究。

电网、供水、燃气和交通等网络系统韧性评估的基本框架是相似的,都涉及到网络连通性,局部破坏会相互影响、并影响到整体的性能恢复。李亚等 (2016)、赵旭东等 (2016) 根据 Bruneau 等 (2003) 提出的韧性定量评估方法对城市供水系统的韧性进行了评估;李倩等 (2019) 结合国内外相关研究成果,对供水系统地震韧性的评价方法做了系统综述;王晶等 (2018) 基于韧性城市视角,对冰雪天气下路网交通恢复问题进行了研究;陈群等 (2018) 通过贝叶斯网络建立了地铁工程系统的韧性模型。对于供电网状系统,孙江玉等 (2018) 对已有的地震灾害下电网性能研究进行了系统综述;齐世雄等 (2019) 提出了综合能源系统的恢复力指标和分析框架,对极端事件下电-气混联综合能源系统的恢复力进行了分析。目前,对于我国燃气管网抗震韧性的相关研究较为薄弱,虽然交通、供水和电力系统等均有一定的研究成果,但是考虑维度较为单一,结合具体城市和工程实例的分析成果较少,与国外在该领域的研究差距较大。

将恢复力等概念应用到相应的单体工程结构上,能够在灾后保障生命安全的前提下,实现工程结构在震后的快速、降低成本的恢复,从而尽可能降低震后灾害损失和影响,保证功能不中断或尽快恢复。周颖等 (2019) 从设防目标、规范标准、结构体系、设计方法、性能指标以及工程应用等方面阐述可恢复功能结构的特点及其与传统抗震结构的区别;祁淳 (2016) 基于建筑可恢复性,从结构系统和非结构系统角度划分了 5 个建筑的地震可恢复等级;韩建平等 (2018) 基于功能恢复能力的概念,建立了结构体系的地震损失模型,实现自复位结构体系的抗震性能分析即定量评估;吕西林等 (2019) 对可恢复功能防震结构进行了总结,并致力于提出更多的可恢复功能防震结构新体系,从而形成统一的设计规范;宁晓晴和戴君武 (2017)、宁晓晴 (2018) 对地震可恢复性的评价方法进行了梳理总结,对地震可恢复性以及相关联的非结构系统性能抗震研究发展方向提出了建议。对于桥梁结构,何超超和项贻强 (2017) 基于国内外对于结构灾害可恢复性的研究基础,提出桥梁灾害可恢复性的评价指标框架体系,具有较强的适应性;许圣 (2015) 对钢

筋混凝土公路连续梁桥地震风险与抗震可恢复性进行了分析;刘洋等(2017)建立一种钢筋混凝土梁桥震后可恢复性评价方法,将桥梁可恢复性与地震强度大小进行了联系。对于其它建筑,刘如山等(2010)对变电站地震可恢复性进行诠释,建立震后依据烈度快速评估受灾地区变电站的可恢复性定量评估方法。目前,我国在工程结构领域的可恢复研究较多,已形成一定的研究体系和评价标准,但是对于工程实例仍然缺少应用和验证。

尽管我国已经开始对“韧性”有一些综合类的研究,但针对具体系统、具体工程的韧性定量评估研究仍不够充分。且由于我国国情复杂、地域广阔,国内韧性研究仍未形成权威统一的定量评价指标体系(方东平等,2017)。因此,基于不同工程系统,建立适用于我国国情的韧性定量评估方法及评价体系,对我国的灾后分析、设施恢复重建,具有重要的参考价值和广泛的发展空间。

## 5 结论与展望

本文给出了韧性量化评估的七要素:鲁棒性、可靠性、快速性、恢复时长、恢复程度、恢复策略和级联效应,并阐述了韧性评价七要素和4个领域之间的联系。基于韧性七要素对现有的韧性定量评估方法进行分析和整理发现,现有方法按照是否考虑不确定性可以分为两类,每种度量方法还可以根据是否考虑时间的影响分为基于静态性能的方法和基于动态性能的方法。本文给出了每种韧性量化模型方法的优势和局限性:确定性方法根据系统性能与韧性之间建立了量化的公式,它的优点是可以根据公式计算出系统的韧性值,利于给出指导实际工程和决策的具体数值,以及成果的实际应用与工程推广;而考虑不确定性的方法更多考虑的是系统发生中断的概率对韧性的影响,而难以给出确定的结果,有利于从宏观的角度了解系统的韧性冗余度,这两类方法的应用侧重不同。此外,现有的韧性定量评估方法若想应用于工程实际,必须因地制宜,结合系统特点和行为,基于实际算例进行计算,这些是目前韧性研究的难点和重点。

通过对现有的韧性定量评估方法的综述与归

纳,总结出我国目前韧性研究中值得关注的2个问题:①社区韧性的区域性差异:由于我国幅员辽阔,南北地区包括城市之间的经济发展水平差异较大,不同研究对象下的社区韧性评价指标和指标权重均应体现自身的特点,针对不同发展水平城市,不同类型社区的特点进行划分,并构建对应的评价体系是较有意义的工作;②基础设施韧性的级联效应:基础设施之间的相互依赖可以产生级联失败或放大效应,给基础设施韧性的真实评价带来了很大困难,这也是下一步值得关注的问题。

## 参考文献:

- 陈群,黄骞,陈哲,等. 2018. 基于贝叶斯网络的地铁工程系统韧性评价[J]. 中国安全科学学报, 28(11): 98-103.
- 陈宣先,王培茗. 2018. 韧性城市研究进展[J]. 世界地震工程, 34(3): 78-84.
- 方东平,李在上,李楠,等. 2018. 城市韧性——基于“三度空间下系统的系统”的思考[J]. 土木工程学报, 50(7): 1-7.
- 郭小东,安群飞,王威. 2016a. 基于韧性理论的老旧社区灾害风险评估及优化策略[C]// 规划60年:成就与挑战—2016中国城市规划年会论文集.
- 郭小东,苏经宇,王志涛. 2016b. 韧性理论视角下的城市安全减灾[J]. 上海城市规划, (1): 41-44; 71.
- 韩建平,付志君,李一明. 2018. 基于性能的自复位钢框架震后功能恢复能力量化分析[J]. 土木工程学报, 51(增刊2): 110-115.
- 何超超,项贻强. 2017. 桥梁灾害可恢复性评价体系研究[J]. 科技通报, 33(4): 208-212.
- 李倩,郭恩栋,李玉芹,等. 2019. 供水系统地震韧性评价关键问题分析[J]. 灾害学, 34(2): 83-88.
- 李亚,翟国方,顾福妹. 2016. 城市基础设施韧性的定量评估方法研究综述[J]. 城市发展研究, (6): 113-122.
- 刘如山,张美晶,郭玉斌. 2010. 汶川地震四川电网震害及功能失效研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 18(增刊1): 200-211.
- 刘洋,林均岐,刘金龙,等. 2017. RC梁桥震后可恢复性评价方法研究[J]. 灾害学, 32(4): 224-229.
- 陆新征,曾翔,许镇,等. 2017. 建设地震韧性城市所面临的挑战[J]. 城市与减灾, (4): 29-34.
- 吕西林,武大洋,周颖. 2019. 可恢复功能防震结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 40(2): 1-15.
- 孟令君,运迎霞,任利剑. 2016. 基于RATA韧性评价体系的既有社区御灾提升策略——以天津市河东区东兴路既有社区为例[C]// 规划60年:成就与挑战—2016中国城市规划年会论文集.
- 宁晓晴,戴君武. 2017. 地震可恢复性与非结构系统性能抗震研究略述[J]. 地震工程与工程振动, 37(3): 85-92.
- 宁晓晴. 2018. 重要建筑地震安全性及韧性评价方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 齐世雄,王秀丽,邵成成,等. 2019. 计及弹性恢复的区域综合能源系

- 统多目标优化调度[J]. 中国电力, 52(6): 19–26.
- 祁淳. 2016. 教学建筑地震可恢复性评价方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 孙江玉, 刘创, 欧阳敏, 等. 2018. 地震灾害下电网性能研究综述——以弹性视角为主[J]. 自然灾害学报, 27(2): 14–23.
- 王晶, 刘昊天, 朱建明. 2018. 基于韧性城市视角的冰雪天气下路网恢复问题研究[J]. 中国管理科学, 26(3): 177–187.
- 吴吉东, 李宁, 周扬. 2013. 灾害恢复度量框架——Katrina 飓风灾后恢复应用案例[J]. 自然灾害学报, 22(4): 60–66.
- 许圣. 2015. 钢筋混凝土公路连续梁桥地震风险与抗震可恢复性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 翟长海, 刘文, 谢礼立. 2018. 城市抗震韧性评估研究进展[J]. 建筑结构学报, 39(9): 1–9.
- 赵旭东, 陈志龙, 蔡浩. 2016. 城市关键基础设施体系毁伤恢复力评估方法研究[J]. 兵工学报, (增刊1): 104–111.
- 赵旭东, 陈志龙, 龚华栋, 等. 2017. 关键重大工程体系灾害毁伤恢复力研究综述[J]. 土木工程学报, 50(12): 62–71.
- 周侃, 刘宝印, 樊杰. 2019. 汶川  $M_s 8.0$  地震极重灾区的经济韧性测度及恢复效率[J]. 地理学报, 74(10): 2078–2091.
- 周颖, 吴浩, 顾安琪. 2019. 地震工程: 从抗震、减隔震到可恢复性[J]. 工程力学, 36(6): 1–12.
- Abimbola M, Khan F. 2019. Resilience modeling of engineering systems using dynamic object – oriented Bayesian network approach [J]. Computers & Industrial Engineering, 130(2): 108–118.
- Adams T M, Bekkem K R, Toledo – Duran E J. 2012. Freight resilience measures[J]. Journal of Transportation Engineering, 138(11): 1403–1409.
- Adjetey – Bahun K, Birregah B, Chatelet E, *et al.*, 2016. A model to quantify the resilience of mass railway transportation systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 153: 1–14.
- Albores P, Shaw D. 2008. Government preparedness: using simulation to prepare for a terrorist attack[J]. Computers & Operations Research, 35(6): 1924–1943.
- Alderson D L, Brown G G, Carlyle W M. 2014. Assessing and improving operational resilience of critical infrastructures and other systems [C]. Tutorials in Operations Research: Bridging Data and Decision, 180–215.
- American Society of Mechanical Engineers (ASME). 2009. Innovative Technological Institute (ITI) [M]. Washington: ASME ITI, LLC.
- Ash J, Newth D. 2006. Optimizing complex networks for resilience against cascading failure[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 380(1): 673–683.
- Attoh – Okine N O, Cooper A T, Mensah S A. 2009. Formulation of resilience index of urban infrastructure using belief functions[J]. IEEE Systems Journal, 3(2): 147–153.
- Ayyub B M. 2014. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making[J]. Risk Analysis, 34(2): 340–355.
- Azadeh A, Salehi V, Arvan M, *et al.* 2014a. Assessment of resilience engineering factors in high – risk environments by fuzzy cognitive maps: A petrochemical plant[J]. Safety Science, 68(10): 99–107.
- Azadeh A, Salehi V, Ashjari B, *et al.* 2014b. Performance evaluation of integrated resilience engineering factors by data envelopment analysis: the case of a petrochemical plant[J]. Process Safety & Environmental Protection, 92(3): 231–241.
- Barker K, Ramirez – Marquez J E, Rocco C M. 2013. Resilience – based network component importance measure[J]. Reliability Engineering & System Safety, 117(2): 89–97.
- Baroud H, Barker K, Ramirez – Marquez J E, *et al.* 2014a. Importance measures for inland waterway network resilience [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 62(1): 55–67.
- Baroud H, Ramirez – Marquez JE, Barker K, *et al.* 2014b. Measuring and planning for stochastic network resilience: application to waterway commodity flows[J]. Risk Analysis, 34(7): 1317–1335.
- Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, *et al.* 2003. A framework to quantitatively assess and enhance the science the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 19(4): 733–752.
- Bruneau M, Reinhorn A. 2006. Overview of the Resilience Concept [C]. San Francisco: Proceeding of 8 th national Seismic Conference.
- Chang S E, Shinozuka M. 2004. Measuring improvements in the disaster resilience of communities [J]. Earthquake Spectra, 20(3): 739–755.
- Chen L, Miller – Hooks E. 2012. Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport[J]. Transportation Science, 46(1): 109–123.
- Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. 2010. Seismic resilience of a hospital system[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 6(1–2): 127–144.
- Cox A, Prager F, Rose A. 2011. Transportation security and the role of resilience: a foundation for operational metrics [J]. Transport Policy, 18(2): 307–317.
- Dinh L T T, Pasman H, Gao X, *et al.* 2012. Resilience engineering of industrial processes: principles and contributing factors[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(2): 233–241.
- Enjalbert S, Vanderhaegen F, Pichon M, *et al.* 2011. Assessment of Transportation System Resilience [M]. Milano: Human Modelling in Assisted Transportation. Springer.
- Faturechi R, Levenberg E, Miller – Hooks E. 2014. Evaluating and optimizing resilience of airport pavement networks[J]. Computers & Operations Research, 43(3): 335–348.
- Faturechi R, Miller – Hooks E. 2014. Travel time resilience of roadway networks under disaster[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 70(12): 47–64.
- Franchin P, Cavalieri F. 2015. Probabilistic assessment of civil infrastructure resilience to earthquakes[J]. Computer – Aided Civil and Infrastructure Engineering, 30(7): 583–600.
- Francis R, Bekera B. 2014. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 121(1): 90–103.

- Hashimoto T, Stedinger J R, Loucks D P. 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation[J]. *Water Resources Research*, 18(1): 14–20.
- Henry D, Ramirez – Marquez J E. 2012. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 99(3): 114–122.
- Hernandez – Fajardo I, Dueñas – Osorio L. 2013. Probabilistic study of failures in complex interdependent lifeline systems[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 111(2): 260–272.
- Holden R, Val D, Burkhard R, et al. 2013. A network flow model for interdependent infrastructures at the local scale[J]. *Safety Science*, 53(1): 51–60.
- Hollnagel E, Woods D D, Leveson N. 2006. Resilience engineering: concepts and precepts[M]. U K; Ashgate.
- Hollnagel E. 2011. Prologue: the scope of resilience engineering[M]. U K; Ashgate.
- Jain S K, Bhunya P K. 2010. Reliability, resilience and vulnerability of a multipurpose storage reservoir[J]. *Hydrological Sciences Journal – Journal Des Sciences Hydrologiques*, 53(2): 434–447.
- Jin J G, Tang L C, Sun L, et al. 2014. Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 63(2): 17–30.
- Khaled A A, Jin M, Clarke D B, et al. 2015. Train design and routing optimization for evaluating criticality of freight railroad infrastructures[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 71(1): 71–84.
- Koç Y, Warnier M, Kooij R E, et al. 2013. An entropy – based metric to quantify the robustness of power grids against cascading failures[J]. *Safety Science*, 59(11): 126–134.
- Muller G. 2012. Fuzzy architecture assessment for critical infrastructure resilience[J]. *Procedia Computer Science*, 12: 367–372.
- National infrastructure advisory council(NIAC). 2009. Critical infrastructure resilience final report and recommendations[EB/OL]. [http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/niac/niac\\_critical\\_infrastructure\\_resilience.pdf](http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/niac/niac_critical_infrastructure_resilience.pdf), Available access on March 6, 2016.
- Orwin K H, Wardle D A. 2004. New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 36(11): 1907–1912.
- Ouyang M, Hong L, Mao Z J, et al. 2009. A methodological approach to analyze vulnerability of infrastructures[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(5): 817–828.
- Ouyang M, Duenas – Osorio L, Min X. 2012. A three – stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 36–37, 23–31.
- Pant R, Barker K, Ramirez – Marquez J E, et al. 2014. Stochastic measures of resilience and their application to container terminals[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 70(1): 183–194.
- Pant R, Barker K, Zobel C W. 2014. Static and dynamic metrics of economic resilience for interdependent infrastructure and industry sectors[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 125(1): 92–102.
- Rinaldi S M, Peerenboom J P, Kelly T K. 2001. Identifying, understanding and analyzing critical infrastructure interdependencies[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(6): 11–25.
- Robert L. 2019. Wears. Special issue, *Safety Science*, High reliability organizations and resilience engineering[J]. *Safety Science*, 117(8): 458–459.
- Rose A, Liao S Y. 2005. Modeling regional economic resilience to disasters; a compuTab. general equilibrium analysis of water service disruptions[J]. *Journal of Regional Science*, 45(1): 75–112.
- Rose A. 2007. Economic resilience to natural and man – made disasters: multidisciplinary origins and contextual dimensions[J]. *Environmental Hazards*, 7(4): 383–398.
- Rose A. 2009. Economic Resilience to Disasters[EB/OL]. [2019–11–01] (2020–02–06). [http://create.usc.edu/sites/default/files/publications/economicresilience\\_todisasters2.pdf](http://create.usc.edu/sites/default/files/publications/economicresilience_todisasters2.pdf)
- Sahebjamnia N, Torabi S A, Mansouri S A. 2015. Integrated business continuity and disaster recovery planning: towards organizational resilience[J]. *European Journal of Operational Research*, 242(1): 261–273.
- Sheffi Y. 2005. The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage[M]. Cambridge: MIT Press Books.
- Sterbenz J P G, Hutchison D, Cetinkaya E K, et al. 2010. Resilience and survivability in communication networks: strategies, principles, and survey of disciplines[J]. *Computer networks*, 54(8): 1245–1265.
- Su Z, Li L, Peng H, et al. 2014. Robustness of interrelated traffic networks to cascading failures[J]. *Scientific Reports*, 4: 5413.
- Vugrin E D, Turnquist M A, Brown N J K. 2014. Optimal recovery sequencing for enhanced resilience service restoration in transportation networks[J]. *International Journal of Critical Infrastructures*, 10(3): 218–246.
- Wang J, Jiang C, Qian J. 2014. Robustness of internet under targeted attack: a cascading failure perspective[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 40(2): 97–104.
- Whitson J C, Ramirez – Marquez J E. 2009. Resiliency as a component importance measure in network reliability[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(10): 1685–1693.
- Youn B D, Hu C, Wang P. 2011. Resilience – driven system design of complex engineered systems[J]. *Journal of Mechanical Design*, 133(10): 101011.
- Youn B D, Hu C, Wang P. 2011. Resilience – Driven system design of complex engineered systems[J]. *Journal of Mechanical Design*, 133(10): 10–11.
- Zobel C W, Khansa L. 2014. Characterizing multi – event disaster resilience[J]. *Computers & Operations Research*, 42(2): 83–94.

## Review on Advances in Quantitative Evaluation Methods for Engineering Seismic Resilience

BI Xirong<sup>1,2</sup>, JI Kun<sup>1</sup>, ZONG Chengcai<sup>1</sup>, REN Yefei<sup>1</sup>, WEN Ruizhi<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

(2. *Earthquake Agency of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, Guangxi, China*)

### Abstract

“Urban and Rural Resilience” has become a research hotspot and future direction in the field of disaster prevention and mitigation in China. The research on the quantitative assessment model of resilience is an important fundamental work to ensure its application. Firstly, according to the related research progress in different engineering fields, this paper summarizes seven factors of resilience evaluation: robustness, reliability, rapidity, recovery time, recovery degree, recovery strategy and cascade effect. Then, the existing resilience quantitative evaluation methods were divided into two categories by whether or not to consider the uncertainty. Each measurement method can be divided into static and dynamic performance-based method according to whether or not to consider the impact of recovery time. The existing quantitative assessment methods are systematically reviewed considering the advantages/disadvantages and their application scope. It is suggested to speed up the application of resilience based on the existing mature research results of vulnerability, durability and seismic risk zoning.

**Keywords:** Urban and Rural Resilience; quantitative evaluation of resilience; engineering resilience; post-disaster recovery; resilience evaluation