

引用格式 孙智,裴顺顺,翟长海,等. 医院抗震韧性研究进展[J]. 工业建筑,2024,54(2):106-116. SUN Z, PEI S S, ZHAI C H, et al. Research Progress on Seismic Resilience of Hospitals[J]. Industrial Construction, 2024, 54(2): 106-116 (in Chinese). DOI: 10.3724/j.gybzG23121431

医院抗震韧性研究进展*

孙智¹ 裴顺顺² 翟长海² 于鹏²

(1. 住房和城乡建设部标准定额研究所, 北京 100835; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150096)

摘要 近年来灾害频发,医院的脆弱性变得日益明显,医院韧性在防灾减灾和灾后恢复方面发挥着至关重要的作用。目前医院抗震韧性的研究不仅仅局限于医院结构的安全性,而是更多地关注医院内部非结构构件和医疗设备的抗震性能,以及医院震后功能量化和迅速恢复的研究。从工程维度探讨了医院韧性的内涵、韧性评价理论框架和建模方法。通过对国内外医院韧性研究的进展进行综述,分析了医院韧性相关概念的联系和区别,总结了医院抗震韧性评价的定性和定量方法,并结合现有研究的局限性对未来的方向和研究要点进行了展望。

关键词 医院;抗震韧性;功能评估

Research Progress on Seismic Resilience of Hospitals

SUN Zhi¹ PEI Shunshun² ZHAI Changhai² YU Peng²

(1. Research Institute of Standards and Norms Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100835, China;
2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150096, China)

Abstract: After disasters, especially earthquakes, the vulnerability of hospitals becomes increasingly evident, and the resilience of hospitals plays a crucial role in disaster prevention, mitigation, adaptation, and recovery in seismic areas. The research on seismic resilience of hospitals is not limited to the structural safety of hospitals, but focus more on the seismic performance of non-structural components and medical equipment within hospitals, as well as quantification and rapidly recover of hospital functions after earthquakes. The paper explored the connotation, theoretical framework, and modeling methods of hospital resilience from engineering dimension. By reviewing the progress of hospital resilience research at home and abroad, the connections and distinctions among relevant concepts of hospital resilience were analyzed, and qualitative and quantitative methods for assessing hospital resilience were summarized. Finally, the paper provided an outlook on future directions and research points in light of the limitations of existing research.

Keywords: hospital; seismic resilience; functionality assessment

* 国家重点研发计划(2023YFC3805100);国家自然科学基金项目(51938004,51825801)。

第一作者:孙智,副研究员,主要从事工程建设标准化方面的研究。

通信作者:翟长海,主要从事建筑与基础设施韧性和智能防灾方面的研究,zch-hit@hit.edu.cn。

收稿日期:2023-12-14

0 引言

近年来国内外地震灾害频发,严重危害了人民群众的生命安全,造成了巨大的经济损失,影响了社会的稳定发展。地震会破坏建筑物和基础设施,同时对医疗系统造成重大干扰,使受灾人群难以获得基本医疗服务。医院作为重要的功能性建筑有必要抵抗地震带来的冲击,在震后维持其基本的服务能力。结合突发灾害性事件的特点,考虑平时和灾后救治需求的变化,医院韧性已经成为我国公立医院高质量发展的重要内容。从工程维度出发,描述了医院抗震韧性的内涵和需要解决的关键科学问题,总结了抗震韧性研究的主要内容和相关方法。

1 医院韧性的内涵

1.1 医院功能

目前,医院韧性的研究受到学界的广泛关注^[1-2]。灾后就医需求激增和医疗资源短缺,使患者的就医需求难以得到满足^[3]。众多研究强调了结构抗震性能与医院服务能力之间的明确关联^[4-5]。医院的资源可用性,包括结构完整性、人员配备和必要的物资,显著影响着灾后医院的功能^[6-8]。值得注意的是,医院内的紧急组织管理被认为是影响灾害适应性的关键因素^[9-12]。医院的功能量化有必要从工程、组织和人员三个角度进行:1)工程系统包括建筑结构、非结构、医疗设备等基本组件;2)组织方面涉及紧急和日常两种情景下的医疗服务的秩序和管理策略;3)医院内的人员组成包括医护人员、行政管理人员和院内病人。工程、组织和人员之间共同协作,以确保医院结构的安全,并提供高质量的医疗服务。

1.2 医院韧性的概念

虽然关于医疗韧性的研究如火如荼,但是目前关于医疗韧性的定义各不相同。韧性(resilience)一词源于拉丁语 *resilio*,意为反弹,现被广泛用于生态学、心理学和工程技术等多个学科。在土木工程领域,Bruneau 等^[13]首次提出社区抗震韧性的概念,并将抗震韧性进一步引申并应用于医院,解释了震后医院功能与救灾和恢复的关系。Zhai 等^[14]提出了基于震后功能损失和恢复时间的双参数抗震韧性评价方法,构建了体现工程系统能力和需求的评价指标。该指标可以体现不同经济发展程度、不同设防水平对系统韧性目标的差异,方便不同量纲的物理量进行比较,改进了将震后功能和恢复时间同等重要的国际通用做法的弊端。韧性量化框架有助于震后的决策过程,以提供有效的改造措施,并指导灾后的恢复工作^[15]。虽然目前有一些关于一般工程系

统韧性概念的研究,但是对于医院的韧性概念仍没有达成共识。

Zhong 等^[16]将医院韧性定义为“医院在保持其关键医疗功能的同时抵御、吸收和应对灾难冲击,然后恢复到其原始状态或适应新状态的能力”。Vugrin 等^[17]将医院韧性定义为“面向灾害的应对能力和救灾的有效性”,Olu^[18]进一步将医院韧性扩展为“医院在灾害发生前、期间和之后全过程内的减灾、备灾、应灾和恢复能力”。Shahverdi^[19]将医院韧性定义为“医院固有的抗灾能力和针对灾难的适应性能力,在灾难期间为患者提供与正常情况下几乎相似的服务”。同时,近期的研究强调了高质量救治和护理的重要性,将韧性定义为医院在应对紧急就医需求激增并提供急救医疗服务时保持基本功能的能力^[20-22]。

Barasa 等^[23]强调,高韧性的医院应当具备适应和变革的能力,以持续提供高质量服务,并有效地应对激增的就医需求。Kruk 等^[24]将医院韧性定义为医疗从业人员、机构以及人群为突发性事件做出的准备,并有效地应对突发性事件,且从中学习和自我重组的能力,考虑应急院内的流线优化。与此相呼应,Blanchet 等^[25]认为一个具有韧性的医院需要具备吸收能力(absorptive capacity)、适应能力(adaptive capacity)以及变革能力(transformative capacity),使医院在遭遇冲击时可以基于现有或者更少的资源继续提供相同水平的医疗服务,应对持续改变的外部环境,实现医疗设施的平急两用。

医院的韧性是各部门紧密协作的体现^[26],同时也是医院与政府、行政组织和公益性社会组织等协同行动的产物^[27]。区别于一般的基础设施系统,医院韧性在缓解灾难性医疗需求激增中发挥的作用是全面性的,不是简单的功能性回弹,而是面向突发事件的适应性和学习性^[28]。张进等^[29]认为医院韧性是针对突发卫生事件的吸收能力、适应能力、变革能力和创新能力。马亚等^[30]结合突发公共卫生事件和医疗卫生行业的特征,将医院韧性界定为在应对影响医院稳定性发展的突发危机事件时,医院在组织、空间、制度、文化和数字 5 个维度上维持正常医疗卫生服务时所表现出的应急准备、承受冲击、韧性抵挡和恢复再造的能力。秦靖等^[2]认为医院韧性是在各类突发事件中,以保持基本医疗服务、医疗救援等的质量与连续性为核心任务,以准备、维持、适应、恢复和学习为主要内容的能力。

从上述文献可以看出,尽管医院韧性的概念并不统一,但医院韧性的表现具有明显的过程性,主要

包括“抵抗”(resistance)、“适应”(adaptation)与“恢复”(recovery)三个主要性质^[31-32]:

- 1)抵抗性。医院在冲击下保证自身的安全性,吸收冲击带来的不利影响,保证医疗服务的持续性;
- 2)适应性。医院通过自身组织协调应对就医需求的突然增加,从而基于剩余医疗资源来提供服务的能力;
- 3)恢复性。在遭受冲击影响后迅速恢复其医疗服务功能的能力。

2 医院建筑结构、非结构构件和医疗设备的地震损伤

2.1 医院建筑结构的抗震性能研究

医院建筑结构安全是震后医院维持其基本服务功能的重要基础。随着社会经济的发展,建筑抗震设计理念从保障“生命安全”向维持“功能安全”转变,从传统的“小震不坏、中震可修、大震不倒”向“基于性能以及基于韧性”的抗震设计转变。与其他一般的建筑结构相比,医院建筑结构在抗震设防方面有着更高的标准。医院的抗震目标不仅要保障震后的人身安全和结构主体不倒塌,还要兼顾安全、经济和功能等多个目标,这样才能发挥医院防灾、救灾和减灾的重要功能。

FEMA P-58^[33]中提出了评估一般单体建筑抗震性能的通用方法,通过易损性曲线,将建筑损伤状态与工程需求参数结合,利用损失函数依据损伤状态计算性能指标(包括人员伤亡、修复费用和修复时间等)。GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》^[34]中提出了一般建筑的抗震韧性评估方法。该方法主要包括以下几个步骤:1)建筑信息集成;2)结构模型建立和弹塑性时程分析;3)结构工程需求参数提取;4)结构损伤状态和结构易损性数据提取;5)建筑性能指标计算(人员伤亡、修复费用和修复时间);6)建筑抗震韧性评级。

2010年颁布执行的《建筑抗震设计规范》^[35],吸收了2008年汶川地震的经验,提高了医院、学校之类具有功能性的公共服务建筑的抗震设防等级,使得这类建筑结构的抗震性能得到一定的提升。准确量化医院结构的地震损伤是进行医院抗震韧性评估的基础,一般通过基于振动台的试验^[36-37]或基于数值模拟的弹塑性分析^[38-40]评价医院结构的地震损伤情况,得到医院结构整体和结构构件的动力响应,进一步提取所需的工程需求参数。由于非线性动力时程分析往往耗费大量计算资源,必要时需以层间位移角、楼面加速度作为工程需求参数进行样本扩充。依据易损性数据库和扩充后的工程需求参

数,判定医院结构的损伤状态。根据损伤状态评估震后建筑的使用功能,判定医院震后是否可以提供紧急的医疗救治服务。

通过吸取2008年汶川地震的震害经验,要求提高新建的医疗建筑的设防等级,并对已有的部分医院进行了改造加固。许多重要的地市及区县级医疗建筑采取了减震和隔震技术,然而部分年代久远的医院存在着未进行抗震设防的问题。大多经过正规设计与施工的医院在地震中表现出较好的抗震性能。采用了减隔震技术的医院,在地震中表现良好,主体结构未发生破坏,非结构构件也基本完好。医疗建筑的救灾功能高度依赖于院内各类非结构构件及医疗设备震后的损伤情况,然而,从众多的震害调查中不难发现,震后部分医院内各类非结构构件和医疗设备地震损伤依旧难以避免。由此,震后医院内非结构和医疗设备的损伤情况及其对医疗服务功能的影响,值得进一步研究。

2.2 医院内非结构构件抗震性能研究

震后医院内结构构件、非结构构件、医疗设备的损坏是医院功能水平下降的重要原因^[41]。在经受地震时,非结构构件往往会先于结构构件发生破坏。国内外众多学者从不同角度研究了震后医院内部不同类型组件的损伤状态,量化其对医疗秩序和服务功能的影响。

非结构构件(建筑非结构构件、建筑附属机电设备和自身及其与结构主体的连接)的破坏往往会使医院内部的服务功能瘫痪。1994年美国北岭地震中,部分医疗中心的消防喷淋系统与冷却系统管道受损,进而发生泄漏使医院浸水,同时这次地震导致了多家医院的供电系统受损,使医院不得不依赖备用发电系统来维持关键医疗设备的运行,影响震后患者的救助^[42]。2008年汶川地震和2011年东日本大地震均出现了电力中断的现象,医院的备用电源也未能长时间维持,同时供氧系统在地震中受损,部分医院的供氧管线断裂,影响了病人的呼吸治疗和手术需求。2010年智利地震中,4家医院因结构和非结构损坏而关闭,超过10家医院因洒水喷头损坏而失去75%的功能^[43]。2013年的7.0级芦山地震使部分框架结构建筑的非结构构件损坏,其中填充墙受到了严重破坏,其他非结构构件也受到了不同程度的破坏,医疗设备受损,存放药品的橱柜和架子的倒塌,导致储药容器破损和药品泄漏等^[41]。尽管这些损坏并没有导致建筑物倒塌,但仍然可能对人员造成伤害,导致经济损失,直接影响医疗服务功能。

非结构构件的抗震性能通过试验(拟静力试验、动力试验和振动台试验)和数值模拟两种手段^[44-46]研究。根据受力特性的不同,非结构构件可以分为位移敏感型和加速度敏感型。位移敏感型非结构构件的破坏主要受层间位移角控制,加速度敏感型非结构构件的破坏主要受楼面加速度控制。相应地,位移敏感型非结构构件的抗震性能试验通常采用拟静力试验方法,加速度敏感型非结构构件则通常采用动力试验和振动台试验方法。

2.3 医院内医疗设备的抗震性能研究

医疗设备是诊断、监测和治疗所需的仪器、设备和材料,对维持医院震后功能至关重要。目前,关于结构构件和一般非结构构件的地震易损性研究已经相对成熟,FEMA P-58^[33]和 GB/T 38591—2020^[34]已经提供了绝大多数的建筑结构和非结构构件的地震易损性模型,但是医疗设备的地震易损性有待进一步研究。

过去的地震经验表明,医疗设备的高度脆弱性对生命安全、功能损失和财产损失构成了重大风险。一项关于 1995 年阪神大地震的调查显示,70%、37%和 29.9%的医院出现了 MRI、透析和 CT 设备的损坏^[47]。2004 年新潟地震中,80%的诊断设备和 40%的治疗设备出现了损坏,无法使用^[48]。在 2012 年的意大利埃米利亚地震中,Mirandola 医院内临床检验分析仪器发生了过大位移^[49]。即使设备本身没有严重损坏,对于对振动较为敏感的设备也需要经过校准和维修,才能重新投入使用^[50-51]。

目前已有关于超声仪^[52-53]、呼吸机^[54]、药架^[55]、橱柜^[56-57]等医疗设备的振动台试验,此类试验以真实地面和楼面振动记录作为输入,研究浮放设备^[58-59]和轮式设备^[54,60]在地震激励下的主要响应模式,该类试验弥补了对医疗设备抗震性能研究的空白。

除了对单个设备进行的试验研究外,国内外学者还对医院房间或整座医院进行了振动台试验研究^[61-63]。针对医疗设备在地震中损坏严重的问题,国内外学者提出可以使用楼板隔震^[64]、设备隔震^[65-66]和约束装置^[67]等措施减轻浮放设备的地震损伤。这些研究有助于对设备抗震性能有更清晰的认识,减少灾害带来的功能损失,确保医疗设备在地震等紧急情况下能够提供不间断的医疗服务。

除了使用振动台试验方法外,还可以采用刚体动力学理论和模拟方法来分析医疗设备等浮放设备在地震中的动力响应和易损性。医疗设备通常具有较高的刚性和规则的外形,在地震作用下表现出刚

体响应和非线性特性^[50,52],因此可以将其视为刚体进行分析^[68-69]。通过有限元方法(Finite Element Method, FEM)和离散元方法(Distinct Element Model, DEM)等数值模拟技术,可以研究医院中的橱柜^[70]等浮放物体在地震中的动力响应问题。Yu 等^[71]进行了针对浮放设备和轮式设备的振动台试验,揭示了在独立放置和靠墙放置两种情况下其地震响应特性和破坏状态,建立了浮放桌上医疗设备地震破坏状态的标准,通过增量动力分析构建了浮放设备的地震易损性曲线。Liu 等^[54]选择呼吸机和麻醉机两种关键医疗设备进行单向振动台试验,研究了轮式设备在不同条件和环境下的抗震性能,采用增量动力分析方法,建立了轮式设备的地震易损性曲线。

为充分考虑医院内灾后实际情况,同时简化医院韧性评估的流程,有必要应用一致的检测标准,对不同类型设备的地震响应、地震损伤情况进行分析并建立地震易损性模型^[72]。这些模型为医院抗震韧性评价提供了迫切需要的易损性基础数据。

3 医院韧性评估

3.1 基于专家经验的医院韧性评估

对医院韧性定性化的评估主要依赖于指标体系的构建,基于专家经验确定指标的得分。其中,最具代表性的是由泛美卫生组织(PAHO)和世界卫生组织(WHO)提出的医院安全指数(Hospital Safety Index, HSI)^[73]。它包括一份医院安全性的检查表,分为灾害的风险、结构安全、非结构安全和紧急情况、灾害管理四个模块。HSI 因其在医院韧性评估中的重要作用,已被拉丁美洲和欧洲的多个国家卫生系统应用到医院安全性评估、新医院设计以及医院改造的过程中。伊朗政府利用该指数对 900 家医院进行了评估,并将资源分配给需要紧急改进的医院^[74]。印度尼西亚设计标准要求医院使用 HSI 评估其灾害准备情况^[75]。Cruz-Vega 等^[76]采用 HSI 对墨西哥震后 35 家医院进行了评估,用以快速确定医院灾后运行的可能性。Luke 等^[77]对澳大利亚北昆士兰地区的 6 家提供全天候急诊和住院服务的医院进行了韧性评估,将 HSI 与现有的国家认证和设施设计标准进行了比较,以评估灾害准备情况并明确医院改进的方向。

Zhong 等^[16,78-80]和 Cimellaro 等^[81]通过问卷调查和因子分析法,从 8 个领域(医院安全、灾害领导与合作、灾害计划、灾害储备和后勤管理、应急人员、应急培训和演习、紧急重症监护能力和恢复机制)中提取 4 个关键因素,其中涵盖:1)医院灾害医疗

能力;2)医院灾害管理机制;3)医院灾害资源;4)医院安全。通过这4个关键因素代表医院抗灾能力的总体水平,以减少医院抗灾分析中包含的变量数量。将各个领域的得分相加,通过得分的线性组合确定因素,最后通过因素的线性组合获得韧性指标。Fallah-Aliabadi 等^[82]通过文献综述研究,开发了关于医院灾害韧性评价指标体系,基于结构与非结构条件,提取建筑韧性,基础设施韧性和行政韧性,评估医院的适应性。尚庆学等^[83]建立了医疗系统抗震韧性评估指标体系,通过层次分析法确定各医疗功能单元、子系统及构件的重要性。

这类基于专家打分类的医院韧性评估方法能够全面地、从多个维度对医院的灾害应对能力进行量化。然而,这种方法也存在一些明显的不足:首先,指标往往偏向定性描述,具有经验性,难以对医院韧性进行精确评估;其次,指标的权重分配难以客观确定,从而影响评估结果的可信度;最后,指标具有较强的静态性,难以反映医院在灾害过程中的功能变化和恢复情况,难以应用于恢复阶段的功能量化和动态分析。

3.2 基于物理机制的工程系统抗震韧性评估

除了基于专家打分的定性化韧性评价方法之外,还有一种基于功能曲线的定量化韧性评估方法。Bruneau 等^[13]最先提出使用系统功能曲线定义和计算系统的灾害韧性。如图1所示,功能曲线的纵坐标为归一化的工程系统功能 Q ,横坐标为时间 t ,整条曲线可大致分为震前、震时瞬时损失和震后恢复过程三个阶段。当地震损坏工程系统时,其功能会立即受到影响,导致在瞬时损失阶段功能曲线快速下降;随着灾后修复工作的进行,工程系统的功能逐渐恢复,导致功能曲线在恢复阶段逐渐上升。图中 S_1 和 S_2 分别代表着不同修复策略下系统的功能曲线, t_0 和 t_1 为地震发生和恢复活动结束的时刻,一旦获得完整的功能曲线 $Q(t)$,可以按式(1)计算得到韧性指标^[84]。

$$R = \int_{t_0}^{t_0+T_{LC}} \frac{Q(t)}{t_{LC}} dt \tag{1}$$

式中: R 为依据功能曲线计算得到的韧性数值; T_{LC} 为控制时间;系统功能 $Q(t)$ 的取值范围为0到100%。

将功能曲线融入医院抗震韧性评价中,曲线的纵坐标代表医院的性能。按照建模复杂性的顺序,将定量的医院性能量化指标分为三类^[85]:1)可用性(医院的容量或是否可以运营);2)救治能力(医院提供的医疗服务数量);3)医疗服务功能(医院提供

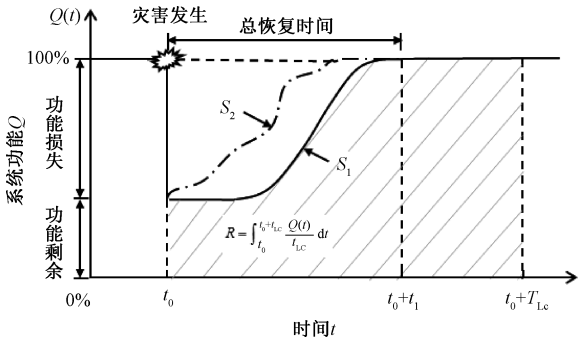


图1 功能曲线

Fig.1 Functionality curves

的服务质量)。

3.2.1 医院可用性

医院震后的可用性是医院运营商和公共医疗部门关注的一个重要方面。它关注的是医院内部工程系统的物理损伤对运营状态的影响(能否提供医疗救助),而不是所提供服务的最终用途(能否满足区域内激增的救治需求)。故障树(FT)^[86]和贝叶斯网络(BN)^[87]是用于系统交互建模的常见分析工具,可以有效量化医院内部结构、非结构和医疗设备对医院可用性的影响。

FT是一种系统可靠性分析工具,基于逻辑树状结构,用于量化系统的失效概率,广泛用于过程系统的风险分析和故障诊断领域。FT在量化组件故障对生命线系统功能的影响^[88]和医院内部子系统(结构、人员和内部机电设备系统)对功能的影响^[8]方面发挥了至关重要的作用。FT分析方法已被广泛应用于考虑医院内部组成部分的韧性评估框架^[89-94]。

BN是一种图形推理技术,用于表达变量之间的因果关系,常应用于可靠性评估^[95]和故障诊断^[96]。同时不少研究已经证实了BN和FT之间的相似性^[97-98],并显示出BN在建模和分析能力方面明显优于FT,通过BN对因果关系的建模,可以在很大程度上放宽FT的限制。目前已有部分研究将BN应用于医院内各个科室震后的可用性评估模型之中^[99-100],该方法可以充分考虑非结构构件、医疗设备和附属机电设备之间的级联效应,结合医院建筑的工程需求参数(楼板峰值加速度、楼板峰值速度和层间位移角)得到不同医疗房间的失效概率。

3.2.2 医院治疗能力

医院的治疗能力被描述为医院提供的服务数量,是医院的自身属性,不受外部救治需求的影响。Bruneau 和 Reinhorn^[15]提出可以使用每天救治患者的数量来反映医院的治疗能力,该指标也适用于区域范围内众多医院的治疗能力。Malavisi^[101]考虑了

地震强度和灾后医院可用急诊室数量,定量地描述医院急诊科在灾后为所有患者提供服务的能力。Favier^[102]进一步引申,将医院内医护人员可用性、资源配置和结构灾后的损伤状态同时作为医院服务能力的主要影响因素,建立建筑物的非弹性结构和非结构响应以及损伤与其功能损失、停机时间和急诊患者治疗率之间的联系。Takahashi 等^[103]通过比较所需和可用的医疗资源并考虑治疗时间的长短,使用最大可治疗的患者人数来估计医院的治疗能力。《城市工程系统抗震韧性评价导则》中关于医院抗震韧性方法考虑结构、非结构和医疗设备的损伤状况,利用 FT 和 BN 方法确定院内关键科室的功能状态,通过医疗资源数量和救治不同类型患者所需的资源数量的比值,考虑一定时间内医疗资源的轮转,进而计算可救治的伤员数量^[104]。

另有研究人员通过医院的救治能力是否满足紧急条件下的医疗服务需求表征医院的功能,Miniati 和 Iasio^[105]通过医院的输入-输出模型来实现对灾后医院的快速脆弱性评估。考虑医院提供的设备和外科资源的医院治疗能力指数及医疗治疗需求,评估医院在灾难性事件中的表现。

3.2.3 医院服务质量

医院服务质量区别于可用性和救治能力,与患者的治疗结果相关,构建与服务功能相关的组织模型需要对治疗需求进行估计。考虑到震后的患者激增,院内患者等待时间的延长导致伤情的恶化,影响患者的健康水平。基于服务质量的功能量化指标有必要考虑病人对有限资源的竞争,量化震后病人的行为和医院运行模式。当前,常见的医院运行过程的建模方法主要包括多智能体建模、离散事件建模和系统动力学建模等^[106]。

多智能体(Agent-based model)仿真是通过创建智能体并对其行为进行定义,将其放置在具有动态特性的指定环境中,使系统的全局行为从大量智能体的行为中体现,通过对智能体之间交互行为的模拟分析整个系统的行为^[107-108]。在医疗系统相关研究中,多智能体建模广泛应用于医院运行过程^[109]和病人院内动线^[110]等方面。Taboada 等^[111]基于多智能体的建模方法建立了急诊部运行仿真模型。该研究将急诊部分为接诊区、候诊区、分诊区和治疗区等功能区,模拟病人在上述各功能区的行为。Kaushal 等^[112]通过建立多智能体模型来评估急诊部的治疗效率,考虑病人所需要的医生、护士和病床等医疗资源,模拟病人在急诊部的分诊、候诊和治疗等过程,以获得病人的候诊时间。

离散事件模拟(Discrete event simulation)是模拟治疗过程和衡量医院在正常情况下的运行状况的常用建模方法^[113-114]。Gul 等^[115]对应用离散事件模拟医院急诊科的研究进行了系统的文献综述,这类研究可以帮助决策者在正常情况和灾难时期出现问题时找到合理的解决方法。文献[34-35]通过离散事件仿真结果结合参数回归总结出一个参数元模型,评估在特定地震灾害下各医院的运行情况。文献[40-41]建立离散事件模拟模型,以等待时间作为震后医院的服务功能,并根据模拟结果建立了一个可适用于任何类型医院的元模型。文献[42]量化了震后物理损伤对医院组织管理的影响,通过 FT 方法计算震后可用科室数量,使用离散事件来模拟医院组织和病人治疗,提出了基于在关键等待时间内接受治疗的患者数量的医院功能评估方法。

系统动力学(System dynamics)关注全局依赖关系的信息,并通过建立微分方程或代数方程描述上述关系,该方法被广泛地应用于医院功能建模的研究中^[116]。从医疗需求与供给的关系出发,Lubyansky^[117]通过系统动力学建模的方法研究了医院员工的工作负荷与救治效率之间的关系。Cassettari 等^[118]建立了医院急诊部的系统动力学模型,考虑医疗资源占用,研究病人在急诊部、观察室和门诊部之间“流动”。对于灾害情景,Hirsch^[119]考虑了供水、供电、通信和交通等基础设施对医院功能的影响。Arboleda 等^[120]模型考虑医院内部变量(病床、医务人员、药品储备、治疗时间和就诊率等)以及外部变量(病人到院率、供电、供水和交通等),构建了一个系统动力学模型用以评估医院的脆弱性。Khanmohammadi 等^[121]采用了系统动力学模拟方法对治疗操作和震后恢复过程的动力学进行建模,考虑患者、医院建筑、医务人员、药品和技术系统等 5 个基本要素,采用无量纲的积压患者数作为医院的性能指标,进而评估其灾害韧性。Li 等^[122]对系统动力学模型中的公用事业(供电、供水、通信和运输)、医疗资源(医务人员、物资和设备)、建筑以及社会和网络因素进行了详细分析,采用医院在一段时间内可以治疗的患者人数与医院需要治疗的患者数量的比率作为医院功能的量化指标。

三种建模方法在医疗系统研究等领域广泛使用,但在描述医院功能方面侧重点各不相同。多智能体建模强调系统中智能体的个体行为和相互作用,能够更真实地反映系统中各个组成部分的行为;离散事件建模关注系统中事件发生的时间点,能够提供对系统动态行为的详细时间信息;系统动力学建

模关注系统中各个变量之间的因果关系,揭示系统的整体行为和复杂的动态关系。

此外,还有一些没有突出医院功能的一般方法,并在恢复评估中使用的通用指标,如地震灾害下的建筑结构构件、非结构构件的破坏状态和维修费用^[123-124],社会损失^[84]和建筑可用空间^[125]等。

3.2.4 小结

对比基于专家经验的评估方法,基于物理机制的工程系统评估方法更客观准确,量化了医院在地震作用下的功能演化规律。医院性能量化指标分为可用性、救治能力和医疗服务功能三类。其侧重点和优缺点如下:

1)可用性指标着重评估医院的基本运营状态,包括床位数、设备和人员等。该指标可以提供对医院基础设施和资源的整体了解,但忽略了医院应对灾难性事件、危机和突发状况的能力;

2)救治能力更关注医院在紧急情况下急诊服务、手术和救护方面的能力,通过灾后院内剩余的医疗资源,考虑资源的合理化重组,评估医院最大的可救治患者数量,忽略了医院对病人的服务质量和救治效果的衡量;

3)医疗服务功能强调医疗服务的质量,可以量化不同类型病人对有限的医务资源的竞争关系,衡量病人的预后水平,但是评估过程考虑因素众多,建模和计算过程较为复杂。

研究人员应该根据评估目的选择适当的性能量化指标,必要时可以将这三类指标结合使用,以全面了解医院不同时期的性能水平。

4 结 论

系统总结了医院韧性的评估方法,涵盖了韧性概念的定义与内涵、功能量化的影响因素,总结了医院功能指标和功能建模方法。重点总结了关于医院内非结构构件和医疗设备抗震性能试验的研究,归纳了医院功能评估框架,将功能量化指标划分为定性和定量两类,并对两类指标的适用范围和建模方法进行了概括。这些研究可为医院抗震性能和韧性提升提供理论和方法支持,为医院日常运营管理以及医院恢复重建和改造决策提供指导性建议。同时,与传统的应急备灾概念不同,医院韧性的研究可促进医院提升应对灾害性事件的综合能力,为韧性医院的建设提供理论支撑和政策建议。

为进一步推进医院的抗震韧性建设,以下4项关键问题有必要在未来的研究中着重考虑:

1)医院内非结构和医疗设备的地震易损性研究。从历次震害调查中发现,采用抗震设计的医院

结构大多基本完好或轻微破坏,但非结构构件及设备的损伤较为严重,影响震后医院的正常运行。目前,关于医疗建筑中的相关附属机电设备和医疗设备的地震动力响应特征及地震易损性的研究仍处于发展阶段。现有医疗设备地震易损性模型主要依赖于国外震害调查数据和试验研究,然而这些数据来源和试验检测标准各不相同。因此,针对不同类型的医疗设备建立统一标准下的地震易损性模型是合理量化医院功能的基础。

2)外部关键基础设施系统和医院之间的耦联机制。医院内附属机电设备的地震损伤及破坏状态将严重影响医院的功能,目前医院韧性的研究往往需要研究医院内部机电设备对震后服务能力的影响。而外部相关的基础设施系统(交通、电力、供水和通信等)的稳定性和运行状态直接影响着医院的正常运转。例如,供电、供水、交通和通信等的功能丧失引起医疗设备无法正常工作和医院内救治能力的下降。对这种耦合机制进行研究可以更好地帮助研究人员了解外部基础设施对医院服务功能和韧性的影响,也可为震后城市恢复的优先级提供合理建议。

3)医院韧性在工程技术维度与组织、社会、经济等非工程要素的有机融合。从工程技术角度阐述了医院抗震韧性的评价方法。除工程系统的韧性外,城市的经济水平、人口组成、年龄分布、教育程度等因素对于震后的应急响应和灾后重建工作的开展有着重要的影响。良好的灾害应急预案和人员培训对在灾害准备、响应和恢复中发挥着至关重要的作用,这同样是保障医院灾后高效运转的基础。融合组织、社会和经济等非工程要素的韧性研究有助于优化医院内部资源的配置,也可以为政府及相关部门提供有针对性的管理建议。

4)由医院韧性评价向医院韧性设计转变。迄今为止的大多数研究主要关注医院的韧性评估,但缺乏针对改建、扩建和新建医疗建筑的韧性设计方法。医疗建筑的韧性设计能够保证医疗建筑结构安全、满足预设医疗功能和确保灾后的快速恢复,提出医疗建筑抗震韧性设计方法将会是未来的研究重点和热点。医院的韧性设计不仅要确保灾后的应急救治能力,还强调医院的日常医疗功能,实现“平震结合”。通过在韧性设计中考虑灾害特点、工程技术、组织管理、社会和经济因素,可以构建更加灵活和稳健的医院,以确保其在面对各种挑战和灾害时能够提供高效的医疗服务。

参 考 文 献

[1] 唐海达. 后疫情时代的低碳韧性医院设计[J]. 建筑技术,

- 2022, 53(12): 1756–1758.
- [2] 秦靖, 韩彩欣. 医院韧性研究进展 [J]. 中国医疗管理科学, 2023, 13(6): 21–25.
 - [3] SINGER A J, THODE JR H C, VICCELLIO P, et al. The association between length of emergency department boarding and mortality [J]. *Academic Emergency Medicine*, 2011, 18(12): 1324–1329.
 - [4] ACHOUR N, MIYAJIM M, KITaura M, et al. Earthquake-Induced Structural and Nonstructural Damage in Hospitals [J]. *Earthquake Spectra*, 2011, 27(3): 617–634.
 - [5] ACHOUR N, MIYAJIMA M. Post-earthquake hospital functionality evaluation: The case of Kumamoto Earthquake 2016 [J]. *Earthquake Spectra*, 2020, 36(4): 1670–1694.
 - [6] ACHOUR N, MIYAJIMA M, PASCALE F, et al. Hospital resilience to natural hazards: classification and performance of utilities [J]. *Disaster Prevention and Management: an International Journal*, 2014, 23(1): 40–52.
 - [7] KALAJA R, MYSHKETA R, SCALERA F. Service quality assessment in health care sector: the case of durres public hospital [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2016, 235: 557–565.
 - [8] JACQUES C C, MCINTOSH J, GIOVINAZZI S, et al. Resilience of the canterbury hospital system to the 2011 Christchurch Earthquake [J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30(1): 533–554.
 - [9] YI P, GEORGE S K, PAUL J A, et al. Hospital capacity planning for disaster emergency management [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2010, 44(3): 151–160.
 - [10] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Performance-based metamodel for healthcare facilities [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 40(11): 1197–1217.
 - [11] CIMELLARO G P, MALAVISI M, MAHIN S. Using discrete event simulation models to evaluate resilience of an emergency department [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2016, 21(2): 203–226.
 - [12] REHAK D. Assessing and strengthening organisational resilience in a critical infrastructure system: Case study of the Slovak Republic [J/OL]. *Safety Science*, 2020, 123 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104573>.
 - [13] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733–752.
 - [14] ZHAI C, ZHAO Y, WEN W, et al. A novel urban seismic resilience assessment method considering the weighting of post-earthquake loss and recovery time [J/OL]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 84 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103453>.
 - [15] BRUNEAU M, REINHORN A. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities [J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(1): 41–62.
 - [16] ZHONG S, CLARK M, HOU X Y, et al. Development of hospital disaster resilience: conceptual framework and potential measurement [J]. *Emergency Medicine Journal*, 2014, 31(11): 930–938.
 - [17] VUGRIN E D, VERZI S J, FINLEY P D, et al. Modeling Hospitals' Adaptive Capacity during a Loss of Infrastructure Services [J]. *Healthcare Engineering*, 2015, 6(1): 85–120.
 - [18] OLU O. Resilient health system as conceptual framework for strengthening public health disaster risk management: an african viewpoint [J/OL]. *Front Public Health*, 2017, 5 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00263>.
 - [19] SHAHVERDI B, TARIVERDI M, MILLER-HOOKS E. Assessing hospital system resilience to disaster events involving physical damage and demand surge [J/OL]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2020, 70 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2019.07.005>.
 - [20] WIIG S, AASE K, BILLETT S, et al. Defining the boundaries and operational concepts of resilience in the resilience in healthcare research program [J/OL]. *BMC Health Services Research*, 2020, 20:1–9 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.1186/s12913-020-05224-3>.
 - [21] MOITINHO DE ALMEIDA M, VAN LOENHOUT J A F, SINGH THAPA S, et al. Hospital resilience after the 2015 earthquake in nepal: results from semi-structured interviews with hospital staff [J/OL]. *Front Public Health*, 2021, 9 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.602509>.
 - [22] OSORIO J, MADRAZO Z, VIDELA S, et al. Use of failure-to-rescue after emergency surgery as a dynamic indicator of hospital resilience during the COVID-19 pandemic: a multicenter retrospective propensity score-matched cohort study [J/OL]. *International Journal of Surgery*, 2022, 106 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.1016/j.ijso.2022.106890>.
 - [23] BARASA E W, CLOETE K, GILSON L. From bouncing back, to nurturing emergence: reframing the concept of resilience in health systems strengthening [J]. *Health Policy and Planning*, 2017, 32 (S 3): 91–94.
 - [24] KRUK M E, MYERS M, VARPILAH S T, et al. What is a resilient health system? Lessons from Ebola [J]. *Lancet*, 2015, 385 (9980): 1910–1912.
 - [25] BLANCHET K, NAM S L, RAMALINGAM B, et al. Governance and capacity to manage resilience of health systems: towards a new conceptual framework [J]. *International Journal of Health Policy and Management*, 2017, 6(8): 431–435.
 - [26] ANDERSON J E, AASE K, BAL R, et al. Multilevel influences on resilient healthcare in six countries: an international comparative study protocol [J/OL]. *BMJ Open*, 2020, 10(12) [2023-12-14]. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-039158>.
 - [27] BAXTER D, CASADY C B. Proactive and strategic healthcare public-private partnerships (PPPs) in the coronavirus (COVID-19) epoch [J]. *Sustainability*, 2020, 12(12): 5097–5114.
 - [28] 宁宁, 吴群红, 孙宏, 等. 卫生系统韧性研究概况及其展望 [J]. *中国预防医学杂志*, 2018, 19(11): 869–870.
 - [29] 张进, 陈宏, 刘国栋, 等. 公立医院的组织韧性: 一个概念框架 [J]. *中国医院管理*, 2019, 39(9): 1–3.
 - [30] 马亚, 龚伟伟, 申俊龙, 等. 突发公共卫生事件中医院韧性作用机制和建设策略研究 [J]. *卫生软科学*, 2023, 37(2): 14–17.
 - [31] PEI S S, ZHAI C H, WANG Z Q, et al. Resilience assessment of the interdependent transportation-healthcare system during emergency response [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022: 1–15.
 - [32] PEI S S, ZHAI C H, WEN W P, et al. A dynamic patients dispatch and treatment model for resilience evaluation of interdepend-

ent transportation-healthcare system [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2023; 1-26.

[33] FEMA. Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake mode; Hazus-MH 2.1; Technical manual [S]. Washington, DC: FEMA, 2013.

[34] 中华人民共和国住房和城乡建设部标准定额研究所. 建筑抗震韧性评价标准: GB/T 38591—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020; 68.

[35] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[36] SATO E, FURUKAWA S, KAKEHI A, et al. Full-scale shaking table test for examination of safety and functionality of base-isolated medical facilities [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 40(13): 1435-1453.

[37] SHI Y, KURATA M, NAKASHIMA M. Disorder and damage of base-isolated medical facilities when subjected to near-fault and long-period ground motions [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 43(11): 1683-1701.

[38] 丁焕龙, 林涛, 钟蔚秀, 等. 成都市第二人民医院龙潭医院结构抗震设计 [J]. *建筑结构*, 2016, 46(增刊2): 235-238.

[39] 徐敬海, 李向阳, 陈鼎超. 面向抗震防灾规划的建筑物震害评估方法 [J]. *城市问题*, 2016(11): 47-52.

[40] 吴筑海. 医院建筑抗震特性分析及结构设计 [J]. *建筑结构*, 2011, 41(4): 52-56.

[41] 王玉梅, 熊立红, 许卫晓. 芦山 7.0 级地震医疗建筑震害与启示 [J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(4): 44-53.

[42] PLANNING C O O S H, DEVELOPMENT, AYRES, et al. Northridge earthquake hospital water damage study [M]. Office of Statewide Health Planning & Development, Division of Facilities Development, 1996.

[43] PERRONE D, CALVI P M, NASCIMBENE R, et al. Seismic performance of non-structural elements during the 2016 Central Italy earthquake [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, 17(10): 5655-5677.

[44] 贺思维, 曲哲, 周惠蒙, 等. 非结构构件抗震性能试验方法综述 [J]. *土木工程学报*, 2017, 50(9): 16-27.

[45] 尚庆学, 李吉超, 王涛. 管线系统抗震性能研究方法综述 [J]. *世界地震工程*, 2018, 34(4): 174-1781.

[46] 尚庆学. 管线系统抗震性能研究及易损性分析 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019.

[47] MYRTLE R C, MASRI S F, NIGBOR R L, et al. Classification and prioritization of essential systems in hospitals under extreme events [J]. *Earthquake Spectra*, 2005, 21(3): 779-802.

[48] NEBIL A, MIYAJIMA M, IKEMOTO T, et al. Damage analysis of health care facilities in the 2004 niigata-ken chuetsu earthquake [C]//Proceedings of the JSCE Earthquake Engineering Symposium. Japan Society of Civil Engineers, 2005.

[49] MASI A, SANTARSIERO G, GALLIPOLI M R, et al. Performance of the health facilities during the 2012 Emilia (Italy) earthquake and analysis of the Mirandola hospital case study [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014, 12: 2419-2443.

[50] MIRANDA E, MOSQUEDA G, RETAMALES R, et al. Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile earthquake [J]. *Earthquake Spectra*, 2012, 28(S1): 453-471.

[51] PRICE H J, DE SORTIS A, SCHOTANUS M. Performance of the San Salvatore Regional Hospital in the 2009 L'Aquila Earthquake [J]. *Earthquake Spectra*, 2012, 28(1): 239-256.

[52] WANG D, DAI J, NING X. Shaking table tests of typical B-ultrasound model hospital room in a simulation of the Lushan earthquake [J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 2016, 49(1): 116-124.

[53] NIKFAR F, KONSTANTINIDIS D. Experimental study on the seismic response of equipment on wheels and casters in base-isolated hospitals [J/OL]. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145(3) [2023-12-14]. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002266](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002266)

[54] LIU J, ZHAI C, YU P, et al. Experimental and numerical analysis of wheeled medical equipment with adjacent wall subjected to earthquakes [J/OL]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 72 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106635>.

[55] KUO K C, SUZUKI Y, KATSURAGI S, et al. Shake table tests on clutter levels of typical medicine shelves and contents subjected to earthquakes [J]. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2011, 40(12): 1367-1386.

[56] SHANG Q, LI J, DU C, et al. Seismic fragility analysis of free-standing hospital cabinets based on shaking table tests [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2023, 27(8): 1993-2012.

[57] DI SARNO L, MAGLIULO G, D'ANGELA D, et al. Experimental assessment of the seismic performance of hospital cabinets using shake table testing [J]. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2019, 48(1): 103-123.

[58] KONSTANTINIDIS D, MAKRIS N. Experimental and analytical studies on the response of freestanding laboratory equipment to earthquake shaking [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2009, 38(6): 827-848.

[59] HUTCHINSON T C, CHAUDHURI S R. Bench-shelf system dynamic characteristics and their effects on equipment and contents [J]. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2006, 35(13): 1631-1651.

[60] NIKFAR F, KONSTANTINIDIS D. Shake table investigation on the seismic performance of hospital equipment supported on wheels/casters [J]. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2017, 46(2): 243-266.

[61] MOSQUEDA G, RETAMALES R, FILIATRAULT A, et al. Testing facility for experimental evaluation of non-structural components under full-scale floor motions [J]. *The Structural Design of Tall Special Buildings*, 2009, 18(4): 387-404.

[62] SATO E, FURUKAWA S, KAKEHI A, et al. Full-scale shaking table test for examination of safety and functionality of base-isolated medical facilities [J]. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2011, 40(13): 1435-1453.

[63] PANTOLI E, CHEN M C, WANG X, et al. Full-scale structural and nonstructural building system performance during earthquakes: Part II-NCS damage states [J]. *Earthquake Spectra*, 2016, 32(2): 771-794.

[64] MORALES E, FILIATRAULT A, AREF A. Seismic floor isolation using recycled tires for essential buildings in developing countries [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, 16(12): 6299-6333.

[65] PELLECCIA D, LO FEUDO S, VAIANA N, et al. A procedure to model and design elastomeric-based isolation systems for the

- seismic protection of rocking art objects [J]. *Computer-Aided Civil Infrastructure Engineering*, 2022, 37(10): 1298–1315.
- [66] DESTRO BISOL G, DEJONG M, LIBERATORE D, et al. Analysis of seismically-isolated two-block systems using a multi-rocking-body dynamic model [J]. *Computer-Aided Civil Infrastructure Engineering*, 2023, 38(12): 1583–1604.
- [67] CHAI J, LIN F. Seismic retrofit and shaking table test of medical equipment in a hospital [C]//*Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society*. Auckland, New Zealand, 2011: 14–16.
- [68] COMERIO M C, STALLMEYER J C. Laboratory equipment: estimating losses and mitigation costs [J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 779–797.
- [69] COMERIO M C, STALLMEYER J. Nonstructural loss estimation: the UC Berkeley case study [M]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2001.
- [70] PETRONE C, DI SARNO L, MAGLIULO G, et al. Numerical modelling and fragility assessment of typical freestanding building contents [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017, 15: 1609–1633.
- [71] YU P, ZHAI C, LIU J, et al. Shake table tests for the seismic performance assessment of desktop medical laboratory equipment considering the effect of adjacent walls and restrainers [C]//*Proceedings of the Structures*. Elsevier, 2023.
- [72] 尚庆学. 医疗系统抗震韧性评价方法研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.
- [73] WORLD HEALTH O, PAN AMERICAN HEALTH O. Hospital safety index: guide for evaluators [M]. 2nd ed. Geneva: World Health Organization, 2015.
- [74] MOJTAHEDI M, SUNINDIJO R Y, LESTARI F, et al. Developing hospital emergency and disaster management index using TOPSIS method [J]. *Sustainability*, 2021, 13(9): 5213.
- [75] SUNINDIJO R Y, LESTARI F, WIJAYA O. Hospital safety index: assessing the readiness and resiliency of hospitals in Indonesia [J]. *Facilities*, 2020, 38(1/2): 39–51.
- [76] CRUZ-VEGA F, ELIZONDO-ARGUETA S, SÁNCHEZ-ECHEVERRÍA J C, et al. Hospitals of the Mexican Institute of Social Security in the Face of September 2017 earthquakes: analysis from the perspective of the safe hospital program [J]. *Gaceta Medica de Mexico*, 2018, 154: 575–581.
- [77] LUKE J, FRANKLIN R C, DYSON J, et al. Building toward a disaster resilient health system: a study of hospital resilience [J/OL]. *Disaster Med Public Health Prep*, 2022, 17[2023-12-14]. <https://doi.org/10.1017/dmp.2022.204>.
- [78] ZHONG S, HOU X Y, CLARK M, et al. Disaster resilience in tertiary hospitals: a cross-sectional survey in Shandong Province, China [M]//*International Disaster Health Care*. Apple Academic Press, 2017: 63–96.
- [79] ZHONG S, CLARK M, HOU X Y, et al. Development of key indicators of hospital resilience: a modified Delphi study [J]. *Journal of Health Services Research & Policy*, 2015, 20(2): 74–82.
- [80] ZHONG S, CLARK M, HOU X Y, et al. Validation of a framework for measuring hospital disaster resilience using factor analysis [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(6): 6335–6353.
- [81] CIMELLARO G P, MALAVISI M, MAHIN S. Factor analysis to evaluate hospital resilience [J/OL]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2018, 4(1) [2023-12-14]. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000952>.
- [82] FALLAH-ALIABADI S, OSTADTAGHIZADEH A, ARDALAN A, et al. Towards developing a model for the evaluation of hospital disaster resilience: a systematic review [J]. *BMC Health Services Research*, 2020, 20(1): 1–11.
- [83] 尚庆学, 李吉超, 王涛. 医疗系统抗震韧性评估指标体系 [J]. *工程力学*, 2019, 36(增刊1): 106–110.
- [84] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(11): 3639–3649.
- [85] YU P, ZHAI C, LIU J, et al. Resilience assessment methods for hospitals subjected to earthquakes: State of the art [J]. *Earthquake Engineering and Resilience*, 2022, 1(1): 40–59.
- [86] LEE W S, GROSH D L, TILLMAN F A, et al. Fault tree analysis, methods, and applications: review [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1985, R-34(3): 194–203.
- [87] MAHADEVAN S, ZHANG R, SMITH N. Bayesian networks for system reliability reassessment [J]. *Structural Safety*, 2001, 23(3): 231–251.
- [88] YOUANCE S, NOLLET M J, MCCLURE G. Effect of critical sub-system failures on the post-earthquake functionality of buildings: A case study for Montréal hospitals [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2016, 43(10): 929–942.
- [89] LUPOI A, CAVALIERI F, FRANCHIN P. Probabilistic seismic assessment of health-care systems at regional scale [C]//*The 15WCEE-15th World Conference on Earthquake Engineering*. Rome, Italy: 2012.
- [90] HASSAN E M, MAHMOUD H. Full functionality and recovery assessment framework for a hospital subjected to a scenario earthquake event [J]. *Engineering Structures*, 2019, 188: 165–177.
- [91] LUPOI A, CAVALIERI F, FRANCHIN P. Component fragilities and system performance of health care facilities [M]//*SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk: Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013: 357–384.
- [92] MINIATI R, CAPONE P, HOSSER D. Decision support system for rapid seismic risk mitigation of hospital systems. Comparison between models and countries [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014(9): 12–25.
- [93] SHANG Q, WANG T, LI J. Seismic resilience assessment of emergency departments based on the state tree method [J/OL]. *Structural Safety*, 2020, 85: 101944 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.101944>.
- [94] YU P, WEN W, JI D, et al. A Framework to Assess the Seismic Resilience of Urban Hospitals [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 1–11.
- [95] WILSON A G, HUZURBAZAR A V. Bayesian networks for multi-level system reliability [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2007, 92(10): 1413–1420.
- [96] PRZYTYLA K W, THOMPSON D. Construction of Bayesian networks for diagnostics [C]//*2000 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat No 00TH8484)*, IEEE. Montana, USA: 2000.

[97] KHAKZAD N, KHAN F, AMYOTTE P. Safety analysis in process facilities: comparison of fault tree and Bayesian network approaches [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(8): 925-932.

[98] BOBBIO A, PORTINALE L, MINICHINO M, et al. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 71(3): 249-260.

[99] LIU J, ZHAI C, YU P. A probabilistic framework to evaluate seismic resilience of hospital buildings using bayesian networks [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 226: 226-241.

[100] PEI S, ZHAI C, HU J, et al. Seismic functionality of healthcare network considering traffic congestion and hospital malfunctioning: A medical accessibility approach [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023: 97-117.

[101] MALAVISI M, CIMELLARO G P, TERZIC V, et al. Hospital Emergency Response Network for Mass Casualty Incidents [C]// Structures Congress 2015. Porland, Oregon: 2015: 1573-1584.

[102] FAVIER P, POULOS A, VASQUEZ J A, et al. Seismic risk assessment of an emergency department of a chilean hospital using a patient-oriented performance model [J]. Earthquake Spectra, 2019, 35(2): 489-512.

[103] TAKAHASHI A, ISHII N, KAWASHIMA T, et al. Assessment of medical response capacity in the time of disaster: the estimated formula of Hospital Treatment Capacity (HTC), the maximum receivable number of patients in hospital [J]. The Kobe Journal of Medical Sciences, 2007, 53(5): 189-198.

[104] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 城市工程系统抗震韧性评价导则: RISN-TG041—2022[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022.

[105] MINIATI R, IASIO C. Methodology for rapid seismic risk assessment of health structures: case study of the hospital system in Florence, Italy [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2012, 2: 16-24.

[106] 李在上. 基于混合建模的医疗系统地震韧性定量评估与提升方法 [D]. 北京:清华大学, 2022.

[107] MACAL C M, NORTH M J. Tutorial on agent-based modeling and simulation[C]//Proceedings of the Winter Simulation Conference. IEEE, 2005.

[108] 赵军平, 杨宏桥, 郭华源, 等. 基于 Multi-Agent 的医院系统建模仿真方法研究 [J]. 生物医学工程学杂志, 2010, 27(6): 1346-1349.

[109] STAINSBY H, TABOADA M, LUQUE E. Towards an agent-based simulation of hospital emergency departments[C]//2009 IEEE International Conference on Services Computing, IEEE, 2009.

[110] 汪云峰. 基于空间认知智能体的医院流线结构评价 [J]. 系统仿真学报, 2019, 31(2): 181-188.

[111] TABOADA M, CABRERA E, IGLESIAS M L, et al. An agent-based decision support system for hospitals emergency departments [J]. Procedia Computer Science, 2011, 4: 1870-1879.

[112] KAUSHAL A, ZHAO Y, PENG Q, et al. Evaluation of fast track strategies using agent-based simulation modeling to reduce waiting time in a hospital emergency department [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2015, 50: 18-31.

[113] GUNAL M M. A guide for building hospital simulation models [J]. Health Systems, 2012, 1(1): 17-25.

[114] ZHANG X. Application of discrete event simulation in health care: a systematic review [J]. BMC Health Services Research, 2018, 18(1): 1-11.

[115] GUL M, GUNERI A F. A comprehensive review of emergency department simulation applications for normal and disaster conditions [J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 83: 327-344.

[116] CHANG A Y, OGBUOJI O, ATUN R, et al. Dynamic modeling approaches to characterize the functioning of health systems: a systematic review of the literature [J]. Social Science Medicine, 2017, 194: 160-167.

[117] LUBYANSKY A. A system dynamics model of health care surge capacity[C]//Proceedings of the 23rd International Conference of the System Dynamics Society. Boston, USA:2005.

[118] CASSETTARI L, ORFEO A, ROLANDO F, et al. A system dynamics study of an emergency department impact on the management of hospital's surgery activities [C]//Special Session on Health Applications. Reykjavík, Iceland: 2013.

[119] HIRSCH G B. Modeling the consequences of major incidents for health care systems[C]// the 22nd International Conference of the System Dynamics Society. Oxford, England:2004.

[120] ARBOLEDA C A, ABRAHAM D M, LUBITZ R J J O P O C F. Simulation as a tool to assess the vulnerability of the operation of a health care facility [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2007, 21(4): 302-312.

[121] KHANMOHAMMADI S, FARAHMAND H, KASHANI H. A system dynamics approach to the seismic resilience enhancement of hospitals [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 31: 220-233.

[122] LI Z, LI N, CIMELLARO G P, et al. System dynamics modeling-based approach for assessing seismic resilience of hospitals methodology and a case in China [J]. Journal of Management in Engineering, 2020, 36(5): 04020050.

[123] SHANG Q, WANG T, LI J. A quantitative framework to evaluate the seismic resilience of hospital systems [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020, 26(7): 3364-3388.

[124] PÉREZ JIMÉNEZ F J, MORILLAS L. Effect of the Importance factor on the seismic performance of health facilities in medium seismicity regions [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2019, 26(1): 546-562.

[125] MITRANI-REISER J, MAHONEY M, HOLMES W T, et al. A functional loss assessment of a hospital system in the bio-bio province [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(S1): 473-502.