

# 重大工程设施抗爆韧性设计的思考

卢浩<sup>1</sup>, 陈丹鹤<sup>2</sup>, 邓树新<sup>2</sup>, 熊自明<sup>1</sup>, 王明洋<sup>1,2</sup>

(1. 陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007; 2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 分析了工程设施抗爆韧性设计的必要性, 提出了重大工程抗爆韧性的概念与设计目标。针对民用关键基础设施、军事防护工程, 从提高鲁棒性、降低间接损失、迅速恢复等方面讨论了相应的韧性实现技术。结合韧性与经济性关系, 建立了基于预期总损失与工程总价值之比的韧性指数计算模型, 综合考虑韧性指数与建设、恢复成本, 可用于韧性设计方案决策优化。最后提出发展建议, 包括加强针对重大工程抗爆韧性的技术支撑体系研究; 加快工程抗爆韧性定量评估方法研究; 加快重大工程抗爆韧性数据决策平台建设; 选择典型重大工程并开展抗爆韧性设计示范应用, 推进相关标准规范制定。

**关键词:** 重大工程; 抗爆韧性; 设计目标; 评估模型; 发展建议

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

## Reflection on Anti-Explosion Toughness Design in Major Engineering Facilities

LU Hao<sup>1</sup>, CHEN Danhe<sup>2</sup>, DENG Shuxin<sup>2</sup>, XIONG Ziming<sup>1</sup>, WANG Mingyang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China)

**Abstract:** This paper analyzed the necessity of anti-explosion resilience design for major projects, proposing the concept of anti-explosion resilience and design objective, based on which, corresponding resilience realization techniques concerning robustness improvement, decrease of indirect loss, and fast recovery were discussed for key civil infrastructures and military protection engineering. Moreover, it established a calculation model of resilience index based on the ratio of expected total loss to total project value, integrating the

relationship between resilience and economy. Considering the resilience index and construction and restoration costs, it used the model to optimize the decision of resilience design program. Furthermore, it recommended development proposals, including strengthening anti-explosion resilience investigations on technic-support system of major projects, accelerating the research on resilience evaluation method of engineering anti-explosion toughness, accelerating the construction of data decision platform for anti-explosion resilience of major projects, and selecting major projects and conducting demonstration applications of anti-explosion resilience design to promote the development of relevant specifications.

**Key words:** major projects; anti-explosion resilience; design objective; evaluation model; development proposals

重大工程设施包括城市生命线系统、重要经济目标、战略通道、能源矿山、水利等民用关键基础设施, 以及国防、人防等军事防护工程, 具有建设规模大、投资经费多、战略地位突出等特点, 是国民经济的命脉, 社会发展的保障, 国防力量的依托。无论是针对民用基础设施, 还是军事工程, 爆炸均具有诸多不确定性, 包括发生的可能性、位置、时机、强度等, 这些不确定性造成了实际后果与预期防控目标可能出现重大偏差, 从而导致更大程度的不可控损失。按目前单纯通过防护手段减轻灾害的设计理念, 一旦这些工程面对较大强度爆炸灾害, 往往表现出显著的“一击即溃”的脆性特征。为此, 必须改变传统设计理念, 推动直接抗毁伤设计向结构安全与功能恢复并重的韧性设计转变。

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(52278419)

第一作者: 卢浩(1987—), 男, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为防护结构毁伤评估。

E-mail: lh829829@163.com

通信作者: 王明洋(1966—), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为防灾减灾工程及防护工程。E-mail: wmyrf@163.com



论文  
拓展  
介绍

近年来“韧性”理论在城市防灾、工程抗震等领域得到不断发展应用,如美国旧金山湾区规划和城市研究协会、太平洋地震工程研究中心等分别针对韧性城市提出了具体的性能目标以及基于可恢复性能的设计框架<sup>[1-2]</sup>;美国国家标准和技术研究院制定了城市建筑和基础设施可恢复规划指南<sup>[3]</sup>;北加州结构工程师协会提出了以安全性、可修复性和功能作为评估指标的评价体系<sup>[4]</sup>;同济大学吕西林等<sup>[5-7]</sup>提出可恢复功能抗震结构,采用摇摆和自复位技术,并将损伤集中于可更换的耗能构件中,避免主要构件的损伤,使结构具备在一定强度地震作用下可以快速恢复预定使用功能的能力;陆军工程大学赵旭东等<sup>[8-9]</sup>针对城市关键基础设施在各类毁伤下的恢复能力评估方法开展研究,初步建立了恢复力定量评估体系;郑刚等<sup>[10]</sup>针对岩土与地下工程结构韧性评价与控制进行了研究总结,推动了系统的岩土与地下结构韧性设计理论与框架建立;军事科学院国防工程研究院党爱国等<sup>[11]</sup>针对韧性战场、防护工程韧性相关原理进行了探讨。

上述成果有力推动了韧性理论在工程防灾中的应用,但在国家重大工程设施抗爆韧性方面,相关的研究成果较少,理论框架与技术体系尚未建立,难以满足重大工程设施抗爆安全防护的迫切需求。本文拟从韧性研究的必要性、韧性设计目标、韧性机制实现技术途径、韧性评估模型等方面展开探讨,提出发展建议,为重大工程设施抗爆韧性设计与相关标准制定提供参考。

## 1 工程设施抗爆韧性设计的必要性

当今世界正经历百年未有之大变局,我国周边安全局势升级,军事威胁加剧,恐怖爆炸威胁长期存在,偶然性爆炸事故时有发生。在复杂多变的安全环境下如何实现未来工程结构的韧性设计,以及如何提升已建工程设施抗爆韧性,从而确保国家重大工程设施的安全可靠和稳定运行,关系到国计民生、社会稳定和国土安全。

民用关键基础设施是国家经济社会发展和国防战争潜力的重要保障,随着我国基础设施建设的不断发展,逐步呈现出由普通环境向复杂环境拓展、由单一工程向体系化演变的特点。科索沃战争中,北约军队的作战指令不仅要摧毁南联盟的军事目标,还包括铁路、桥梁、医院等基础设施。俄乌冲突中,关键基础设施已成为双方攻击的重要目标。2022年

9月发生的“北溪”天然气管道遭受水下爆炸导致破裂泄漏事件举世瞩目,其中三条支线一天内均遭到破坏,据估计天然气泄漏量达32万吨,目前难以评估其修复费用和时间,事件带来了巨大的经济损失、环境影响和政治影响<sup>[12]</sup>;之后不久发生的刻赤大桥爆炸事件再次让世人感受到基础设施的“吸引力”,作为俄罗斯其他地区与克里米亚半岛唯一的陆上连接通道,刻赤大桥具有重要的战略意义,其毁坏对交通运输势必造成严重影响。关键基础设施建设发展多处于和平时期,相对于军事目标,其隐蔽性、防护性能较差,袭击这类目标往往成功概率大。随着打击范围由军事目标向民用基础设施蔓延,这些基于“和平假设”的基础设施往往面临重大安全隐患。此外,部分基础设施自身带有“危险”属性,如含有燃气的地下综合管廊、油库、输气管线等,在使用、管理不当的情况下,也会引发灾害性事故。从已发事件后果可以看出,面对战时武器打击和平时多类型突发灾害冲击的威胁,基础设施在遭受大强度的爆炸后往往直接损伤严重,大部分失去使用功能并且修复难度很大,而一些关键基础设施的损坏造成的间接影响甚至远远大于直接影响。

相对于民用基础设施,军事防护工程具有预定的抗武器打击能力,根据抗力水平,大致可将军事防护工程分为两类,一是抗大当量武器打击的高抗力工程,以首脑指挥工程、战略防护工程为代表,这类工程通常采用深地下方式设置;二是抗空爆或小型武器打击的低抗力工程,以浅埋工事、地面军事设施、人防工程为代表。目前在军事防护工程防护设计时往往以一定威胁水平下一次打击不破坏为主要原则,然而相对于武器更新换代速度,防护工程往往建设周期很长,在打击威胁快速升级换代的情况下,很难短时间内实现工程的防护升级,在面临更大当量武器打击的情况下只能被动挨打,造成严重的功能损失,导致工程不可用或难以恢复,且在一次打击后面对后续打击时难以及时恢复其防护功能。即便对于高抗力深地防护工程,也存在如出入口、通风口等易暴露、防护能力有限的薄弱环节,在战时这些防护设施的损坏不仅严重降低其防护能力,还可能造成结构坍塌封堵等影响工程通行能力的情况。相对于高抗力工程,考虑到经济与时间成本,人防工程、浅埋工事、地面工程难以实现抗大当量打击能力,这类工程在打击强度较大的情况下也会呈现出脆性特征,工程使用功能与防护功能往往同时损失。

国家总体安全体系中提出了包括政治安全、国土

安全、军事安全、经济安全等在内的“11种安全”,重大工程抗爆安全与国土、军事与经济安全密切相关,发展重大工程抗爆韧性设计理论与方法也是落实国家总体安全观的重要体现。

## 2 重大基础设施抗爆韧性概念与设计目标

### 2.1 工程抗爆韧性概念与表征

最初在生态系统中应用的韧性概念被描述为:“韧性决定一个系统内在关联的持久性,同时也是系统吸收状态变量、驱动变量和参数变化并维持自身能力的一种衡量”<sup>[13]</sup>。由于各学科背景不同,韧性被给予了不同的定义<sup>[14-16]</sup>,但就内涵来说,通常是相似的,其基本功能就是保护和恢复。因此,工程设施抗爆韧性可被定义为:工程设施具备抵抗、吸收和适应爆炸灾害以及从爆炸灾害中迅速恢复的能力。

爆炸是能量快速释放的复杂过程,爆炸灾害具有局部突发性、不确定性、连锁型等特点,工程抗爆韧性特征归纳为以下几个方面:

(1)鲁棒性,指工程设施在爆炸灾害下维持自身功能、减轻灾害导致各方面损失的能力。

(2)快速性,指工程设施在遭受爆炸灾害后能快速恢复自身结构与功能的能力。

(3)适应性,指工程设施在爆炸灾害威胁前后根据外部环境变化而灵活调整的能力,包括爆炸前预防措施的灵活调整、爆炸后次生灾害的智能阻断等。

(4)冗余性,指工程在应对爆炸灾害时通过增加冗余结构或设施提升工程鲁棒性的能力,冗余性越高,系统灾害后果越小。

(5)资源性,指工程在遭受爆炸灾害后防灾减灾与恢复相关资源储备与调度的能力,通过及时补充和调度资源降低或延缓灾害后果,提升系统恢复速度。

(6)学习性,指工程在爆炸灾害中获取有效信息、学习相关经验并更好地应对未来灾害的能力,通过学习,若能在修复过程中克服原有结构缺陷,还能使工程抗爆性能得到提升。

其中,鲁棒性、快速性是工程抗爆韧性的基本目标,适应性、冗余性、资源性、学习力是抗爆韧性提升的重要手段,可以通过提升工程适应性、冗余性、资源性、学习力增加体系的鲁棒性、快速性。为了更好地说明韧性特征,通常采用系统性能曲线来表征系统韧性发展。本文结合爆炸灾害特点,给出了工程

抗爆韧性的表征示意图,如图1所示,图中横坐标为时间维度,纵坐标为系统性能指数,用来衡量总体性能保持程度。在爆炸直接作用后,可能有4种结果,分别对应曲线a、b、c、d。曲线a表示爆炸灾害后工程完全毁坏,无修复必要;曲线c表示爆炸灾害后工程局部破坏(性能降至 $Q_1$ ),经过一段时间的修复,逐渐达到功能完全恢复;曲线b表示爆炸灾害后导致局部破坏后接着又发生了次生灾害(性能降至 $Q_2$ ),经过一段时间的修复,逐渐达到功能完全恢复;曲线d表示爆炸灾害后,经过对灾害的学习总结,修复后的工程性能( $Q_3$ )高于原来工程。 $t_1$ 表示爆炸灾害发生时刻,其对应的 $Q_1$ 表示爆炸灾害直接影响后系统性能剩余指数,由于爆炸作用时间很短,可忽略爆炸直接影响过程所需时间; $t_2$ 表示存在次生灾害下,次生灾害进一步降低系统性能,其对应的 $Q_2$ 表示爆炸次生灾害影响后系统性能剩余指数; $t_3$ 表示修复程度开始起到效果的起始时刻; $t_4$ 表示系统性能完全恢复时刻。图中 $Q_1$ 、 $Q_2$ 代表鲁棒性, $t_3$ 、 $t_4$ 分别与 $t_1$ 、 $t_2$ 之差代表快速性。适应性和冗余性影响 $Q_1$ 值,通过次生灾害的智能阻断影响 $Q_2$ 值;冗余性影响 $t_3$ 、 $t_4$ 的值;学习力影响 $Q_3$ 的值。

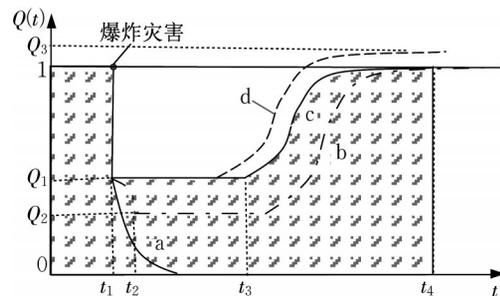


图1 工程抗爆韧性系统性能曲线

Fig.1 Performance of engineering anti-explosion toughness system

### 2.2 工程抗爆韧性3个层级

工程韧性设计通常不能局限于单体结构。基于爆炸巨大的破坏性以及经济性考虑,在工程中,特别是民用工程中通过增加大量的经费去提高结构的抗爆韧性显然是不经济的,应至少将结构、工程、体系3个层级联系起来考虑,在韧性分析时往往由体系到结构,而韧性实现是从局部到系统,首先考虑局部韧性,在局部结构韧性难以实现的情况下力图取得整体工程韧性或体系韧性,如图2所示。

以城市输气管网为例进行说明,其中某段输气管结构、某条输气工程、城市输气管网分别对应图中的结构、工程、体系3个层次,往往从上到下开展分

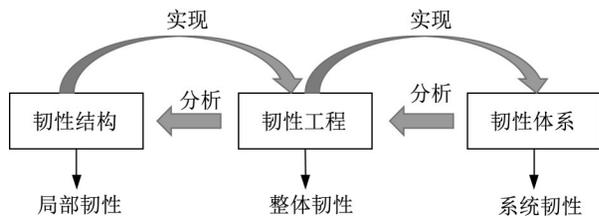


图2 韧性设计3个层次

Fig.2 Three levels of toughness design

析,而实现却是从结构到工程再到体系。对于城市输气管线来说,综合爆炸事故概率、建设成本等因素,在结构设计时通常仅考虑平时使用功能,不考虑抗爆设计,因此抗爆韧性设计需要从工程整体韧性的角度考虑。在韧性工程设计时,虽然爆炸灾害下某一段管线必然会破坏,但还可以通过降低次生灾害,提高修复效率来提高整个工程的韧性。即便不考虑韧性工程,也可以通过降低工程之间的依存性,以及提高体系的冗余性来提升体系的韧性。

### 2.3 工程抗爆韧性设计目标

传统的确定性设计、可靠性设计都是以单维度的安全状态或功能性能水平为设计目标,相比之下,工程抗爆韧性设计的特点是工程安全与功能恢复并重,要求结构在爆炸灾害发生前后能够保持一定的性能稳定性,并可以快速地恢复功能,尽量减少对正常秩序的影响。

抗爆韧性设计是在传统抗爆设计的基础上提出的一种具备更高性能的设计体系,比如对于结构抗爆设计,传统的方式往往采用工程主体结构变形去

消耗、吸收爆炸能量,而这些构件同时也承担着承载功能,一旦出现损伤,结构不仅失去防护能力而且基本的支撑功能也将大大降低,难以保护结构内部的防护对象,并且恢复难度大。而韧性设计不同,重点考虑功能的保持和恢复,对于同时具备防护功能和支撑功能的抗爆结构,可通过防护设施与主体结构相分离的设计理念,主要采用防护设施的变形去吸收、抵抗爆炸能量,即便爆炸荷载超过防护抗力,在防护设施破坏时,主体结构基本功能仍然能够保持,结合模块化、装配式以及先进连接技术,实现已损坏防护设施的快速更换与恢复,快速恢复后的工程具备抵抗再次爆炸冲击的能力。因此,就控制支撑构件损伤和包括整体功能快速恢复方面,韧性设计具备实现更高抗爆性能的能力。

基于上述分析,抗爆韧性设防目标较传统设防目标有着明显的区别,表1为抗爆韧性设防与传统设防目标对比。当威胁等级小于设防强度时,韧性设防目标与传统设防目标基本相同,保证工程功能没有损失是基本目标;当威胁等级大于设防强度时,对于防护工程来说,韧性设计主要从使用功能的保持以及快速恢复方面考虑,对于不考虑抗爆能力的民用基础工程设施,韧性设计目标从减小次生灾害、迅速恢复功能的角度考虑;而当威胁等级远远大于设防强度时,韧性设防与传统设防目标基本相同,这是因为虽然韧性设防能在一定程度上提高工程结构的性能,但也是有限的。

表1 抗爆韧性设计与传统设防目标对比

Tab.1 Comparison of anti-explosion toughness design and traditional fortification target

威胁等级	传统设防目标	抗爆韧性设防目标	
		防护工程	民用基础设施
小于设防强度	结构不应产生损伤,处于安全状态,且可抵抗再次打击	无论是防护设施还是支撑结构不应产生损伤,处于安全状态,且可抵抗再次打击	结构不应产生损伤,处于安全状态
稍大于设防强度	结构出现明显损伤,对使用功能造成一定影响,但能够保持不坍塌,由于刚度降低,抵抗再次打击能力下降	防护设施局部出现明显损伤;支撑结构基本无损伤,防护设施可快速修复,修复后工程整体功能恢复,具备再次抵抗能力	结构出现明显损伤或破坏,可快速修复,结构损伤后影响范围控制在局部,不产生更大的次生灾害
明显大于设防强度	出现结构性坍塌,主体工程完全丧失	防护设施出现结构性破坏,不可修复,需要重建或整体更换;支撑结构可出现损伤,但基本保持支撑功能,可修复	
远远大于设防强度	出现结构性坍塌,主体工程完全丧失	防护设施与支撑结构全部破坏,不可修复,应拆除	出现结构性坍塌,主体工程完全丧失

需要注意的一点是,制定韧性设计性能指标时,必须要考虑经济性,性能指标将直接影响建设成本,经济的可行性也决定了设防标准的可推广性与可持续性,应综合考虑结构功能损失与经济损失,结合韧性提升取得的预期效益,尽可能寻求经济性与韧性提升之间的平衡,建立合理可行的韧性

设计目标。

## 3 工程设施抗爆韧性实现技术思考

对工程有效保护与快速恢复是韧性设计的核心目标,实现该目标必须要有相应的关键技术支撑,随

着智能化、物联网、数字化技术以及先进材料结构的不断应用发展,为爆炸威胁感知、毁伤预测、智能控制、快速装配等工程设施抗爆韧性设计实现提供了机遇和技术支撑,通过现代先进技术与韧性设计理念的有机融合,实现韧性抗爆防护机制的有效运行。

对于民用基础工程设施,在降低间接损失方面,重点考虑防危险源连续泄漏设计、防工程结构连续倒塌设计等,尽量将灾害破坏范围限制在局部破坏区域附近,在迅速恢复功能方面,重点考虑功能构件可快速更换设计。针对具有预定防护功能的工程结构,从提高鲁棒性、降低间接损失、迅速恢复三个方面进行考虑,可将防护功能和使用功能分开设计分析,在一定水平打击下使用功能基本保持、防护设施可快速替换是实现韧性的重要手段;其次,针对防护功能,可以通过设置可快速布设的防护设施来灵活应对不同强度的爆炸威胁,从而增强工程的鲁棒性。

### 3.1 民用基础设施韧性实现技术思考

民用关键基础设施通过工程结构直接抵抗爆炸荷载难度大,加之其建设规模庞大,经济可行性也差。现代战争中常规武器是最可能的打击手段,爆炸作用以局部破坏为主,对于线式、面式布局的民用基础设施,如城市综合管廊、地铁、隧道、桥梁、输油输气管线等,可由防局部破坏向防连续破坏转变,由防爆炸直接破坏向防次生灾害扩大转变,通过阻断爆炸局部破坏引发的灾害链式演化降低灾害影响,从而提高工程的整体鲁棒性。对于点式布局的民用基础设施,如电站、加油加气站、水厂等,单个设施防护难度大,可通过提高冗余性,分散弱化关键部位,提高系统的抗爆鲁棒性。

图3为某水下输气管线面临爆炸灾害时传统设计与韧性设计对比分析。从图3中可以看出,传统设计

仅考虑正常运行时结构可靠性,一旦发生爆炸事件,爆点附近结构出现损伤破坏,从而造成管道内气体大面积泄漏,由于未考虑阻断设计以及可恢复设计,当管道内气体压力大于水压时,将继续泄漏,泄漏至水面上方的气体还可能引发火灾或爆炸,并造成环境污染,直到气体压力小于水压,此时还会出现海水倒灌管道,导致管道内结构腐蚀。考虑韧性设计时,利用先进感知与控制技术,安装传感装置、密闭阀门,并进行分段可恢复连接设计,通过智能感知技术及时识别灾害位置,通过控制系统关闭阀门可及时阻断破坏区外灾害蔓延,并通过损伤段的快速恢复实现管道功能的快速恢复,从而大大降低灾害损失。

民用基础设施种类繁多,实现韧性技术还需要更多的研究成果支撑,包括:①进一步研究平战多灾耦合下区域大规模基础设施体系由初始设施毁伤引发体系多层级联失效的内在机理,揭示不同灾害时空耦合特征下区域大规模基础设施体系级联失效蔓延演化规律,明确其动力学传播路径。②针对灾前防护、灾中应急和灾后恢复各阶段防护资源统一优化配置需求,以体系韧性最优为目标,建立多级博弈、多维协同、综合约束下的防灾资源优化配置理论和动态求解算法。③采用大数据、物联网和人工智能技术,构建数物驱动的综合防灾资源智能优化与动态配置平台。

### 3.2 防护工程韧性实现技术思考

相对于一般民用工程,防护工程通常具备一定的抗爆能力,但在爆炸强度大于设防强度时,工程结构功能会明显下降,防护能力、使用功能同时降低。比如对于图4某坑道口部爆炸,在仅有第一道防护门存在的情况下,一旦防护门所遭受爆炸荷载大于设计荷载,防护门可能出现大变形或损伤,不仅影响其防护效能,还可能造成打不开需要破除的情况,加

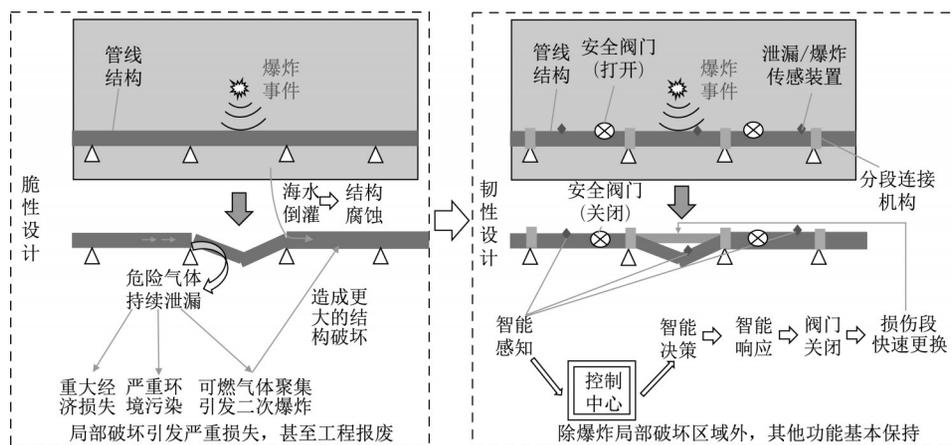


图3 某水下输气管线脆性设计与韧性设计对比

Fig.3 Comparison of brittleness design and toughness design of an underwater gas pipeline

之防护门重量大、更换难,可能导致坑道正常使用功能难以快速恢复。为此,防护工程韧性设计需要尽可能减少爆炸荷载对工程正常使用功能的影响,实现防护设施可更换和快速更换。本文提出一些可能的技术途径,包括:

(1)通过增加灵活机动的防护设施提升防护工程抗爆韧性。以坑道口部爆炸防护为例(图4),在原有防护门的基础上,在口部与原来防护门之间设置可快速拆卸、安装的耗能设施,布置的数量可根据预估的威胁水平调整。对于常规武器爆炸加载,由于加载时间短,在近口部位置主要利用破碎耗能方式,采用可快速安装的脆性板材与坑道结构铰接,脆性

板破坏后消耗一部分爆炸能力,在较远位置可采用刚性板运动耗能机制,从而保证剩余冲击力作用下第一道防护门在弹性变形范围内。对于破碎的板块采用快速可更换设计,还可保证在一定时间范围内实现抗多次打击。

(2)通过防爆设施与主体结构分离配置,将爆炸能量集中于可更换的防护设施,减小对结构使用功能的影响,实现结构防护功能的快速恢复。

(3)通过缓冲吸能介质或材料破碎消耗爆炸能量,利用装配式、模块化或快速注浆等手段实现结构防护功能的快速恢复。

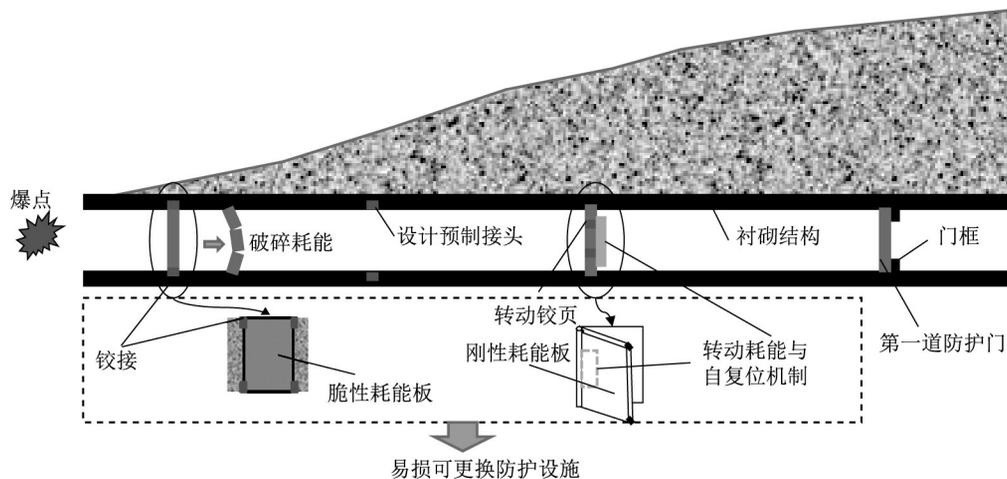


图4 坑道口部防护耗能设施

Fig.4 Protective energy dissipation facilities at tunnel entrance

图5为某地面工事的韧性防护设计示意图。图5a为传统设计方式,采用工程主体结构抗爆,当爆炸荷载大于设计荷载,工程主体结构出现损伤破坏,严重威胁工程内部人员安全和设备运行。结合韧性设计理念,将防护结构与支撑结构分离设计,如图5c所示,最外层是防护结构,最里层是支撑结构,中间是填充的耗能材料,当爆炸荷载大于设计荷载时,相比传统设计,虽然防护层的抗力没有提高,但通过防护结构的破坏和耗能材料可吸收爆炸能量,减少对主体结构的影响,在一次爆炸后,还可通过模块化装配式设计,实现外层防护结构的快速更换,达到抵抗二次打击的目的,从而提高工程的整体韧性。相对于地面防护,地下防护具有伪装性能好、防护面积小的特点,通过地下空间的快速构设实现地面结构快速地下化,也是提高工程抗爆鲁棒性的重要手段,如图5b所示。地下化后也可以利用将防护结构与支撑结构分离设计的手段提高工程韧性,如图5d所示。与

图5c不同的是,由于工程处于地下,结构上方覆土的存在使地下结构可恢复性的难度要大于地面设施,还需要更多的技术手段支撑。

图6为某坑道主体结构韧性防护设计示意图,图6a为传统设计方式,采用坑道衬砌结构抵抗地冲击压力,当爆炸荷载大于设计荷载,工程主体结构出现坍塌破坏,造成坑道堵塞,修复难度大,因此,考虑采用多孔材料作为地下工程防护减震吸能填充材料,可较大幅度地提高地下工程综合防护能力,但多孔材料压缩性高,在一次冲击后会产生大变形,在后续打击情况下难以有效防护。图6b采用等粒径混凝土填充的消波拱设计,利用混凝土破碎耗能,通过预留注浆孔快速注浆使得破碎混凝土恢复胶结状态,一方面达到耗能目的,另一方面实现了消波拱防护性能的快速恢复。图6c体现了地下坑道的模块化、装配式设计理念,其中衬砌结构采用装配式,吸能设施采用模块化设计。在一次爆炸地冲击后,通

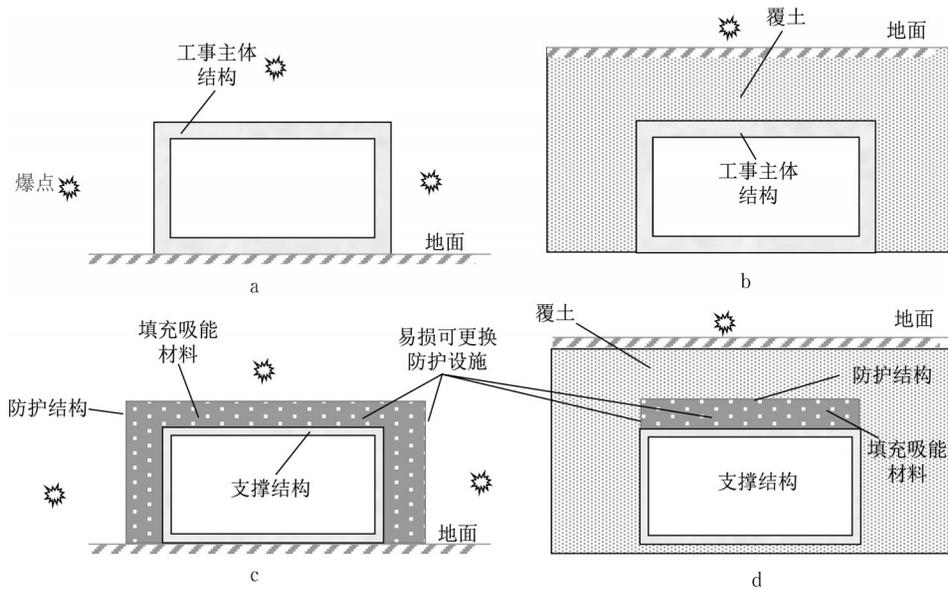


图5 地面工事抗爆韧性防护设计

Fig.5 Anti-explosion toughness protection design of ground works

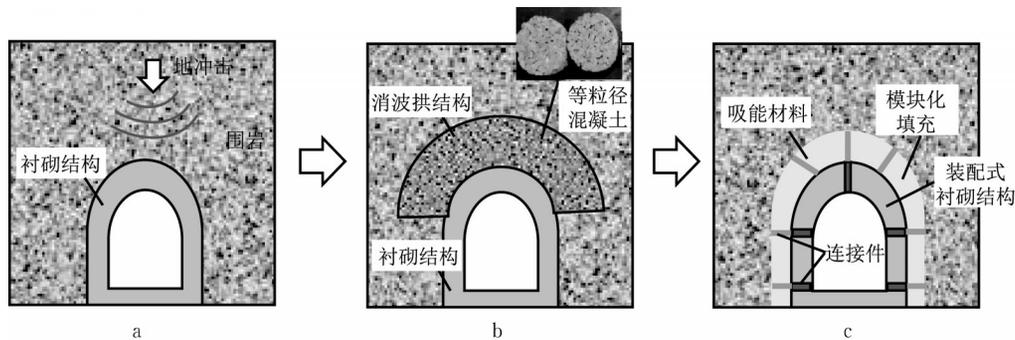


图6 坑道结构抗爆韧性防护设计

Fig.6 Anti-explosion toughness protection design of tunnel structure

过快速拆卸破坏范围内的衬砌结构,更换吸能模块,实现工程防护性能的快速恢复。

### 3.3 工程抗爆韧性实现面临的技术挑战

#### 3.3.1 爆炸威胁智能感知与控制技术

爆炸灾害威胁智能、快速感知与控制是阻断关键基础设施灾害蔓延、控制事故后果的关键手段。重大工程设施爆炸事故具有响应时间极短、爆炸荷载大、爆源环境复杂、风险后果严重、贯穿工程全寿命周期等特点。目前针对强动载灾变的感知技术手段非常有限,已有的监测量测设备存在灾害条件下生存率低、数据自动传输难度大等问题,亟需发展可靠、智能、多方位、贯穿工程全寿命的传感体系,形成爆炸风险智能感知与控制技术,为爆炸灾害及时应对提供技术支撑。

#### 3.3.2 轻质高强复合材料与防护结构

传统工程防护主要关注混凝土和岩土材料等材

料抗爆,这类构件存在自重大、拆卸难度高的特点,与工程功能快速恢复的要求不匹配。实现快速灵活安装必须采用轻质高强、多效一体、快速设防的高性能复合材料与防护结构,目前尚缺乏精细的材料多效协同设计理论与多尺度精确建模方法,需要开展高性能复合材料从微细观到宏观、从单一抗侵爆防护到多效一体防护、从材料尺度到组合结构尺度的系统研究,建立不同复合材料的微元结构、材料宏观性能、抗爆结构防护效能之间的内在联系,从而提高工程韧性抗爆机制实现的可行性。

#### 3.3.3 多节点装配式结构先进连接技术

快速装配式结构是实现功能结构快速可恢复性的重要手段,但同时由于多连接点的存在也会降低工程的整体性、密闭性等功能,分散布置的耗能机制同时也增加细部构筑和施工过程的复杂性,且在工程维护的过程中增加了相应的维护成本,因此需要

针对多节点装配式结构,发展创新新型连接模式,在不降低结构功能的情况下实现快速更换与构造,这也是需要攻克的技术难题之一。

## 4 重大工程设施抗爆韧性评估方法

韧性评估是对工程保护自身与周边环境能力以及自身结构可恢复性的综合评价,是开展韧性设计、方案优化决策的基础,也是韧性研究体系中非常重要的一个环节。

### 4.1 基于性能时程曲线的韧性评估方法

韧性概念在工程应用之初,学者们就关注韧性如何评估这个问题,目前最广泛应用的是利用性能响应函数法进行定量评估<sup>[17-19]</sup>,采用量纲一化的性能指数,通过对性能指数随时间的响应变化曲线获得性能保持累积量,从而评估该设施的韧性,具体见公式(1)。

$$R = \int_{t_{oc}}^{t_{oc} + t_{lc}} Q(t) / t_{lc} dt \quad (1)$$

式中: $R$ 为韧性指数; $t_{oc}$ 为灾害发生时刻; $t_{lc}$ 为从灾害发生到完全恢复的系统控制时间,通常取常数; $Q(t)$ 为 $t_{oc}$ 到 $t_{oc} + t_{lc}$ 期间性能随时间的变化曲线。在工程抗震韧性评估中通常采用经济损失表示结构的功能损失,文献[17]采用损失比与损失概率之积作为结构功能损失评价标准,Cimellaro等<sup>[20]</sup>给出 $Q(t)$ 的计算方法如公式(2)所示。

$$Q(t) = [1 - L(I, t_{re})] \cdot [H(t - t_{oc}) - H(t - t_{oc} - t_{re})] \cdot f_{rec}(t, t_{oc}, t_{re}) \quad (2)$$

式中: $t_{re}$ 为灾害发生后的恢复时间; $I$ 为灾害强度; $L(I, t_{re})$ 为损失函数; $H(t - t_{oc})$ 为阶跃函数; $f_{rec}(t, t_{oc}, t_{re})$ 为恢复函数。

上述韧性评估模型综合考虑了灾害发生概率、结构易损性以及恢复能力等韧性特征因素,在抗震韧性中得到较为广泛的应用。然而,对于重大工程抗爆韧性设计来说,不仅要解决韧性评价问题,更重要的是需要基于评价结果开展决策。相比于传统设计方法,韧性设计的结构性能有新的提升,但同时也会带来更大的成本,比如基础设施增加传感装置、自动控制装置等都会增加建设费用,决策者需要综合考虑经济性来开展韧性设计,此时有必要建立与经济性密切相关的韧性评估模型,并考虑下面两个问题:一是鉴于韧性设计带来的建设成本增加,相对于传统设计方法,韧性设计是否具有经济合理性;二是韧性设计方案不同,增加的成本不同,带来的收益也

不同,如何选择合适的韧性设计方案。

### 4.2 基于损失计算的工程抗爆韧性优化决策模型

韧性设计的最终目的就是通过提高自身鲁棒性和快速恢复性减少损失,无论是鲁棒性还是可恢复性,最终还是体现在对损失的控制。在此,为了便于分析,假设所有的损失类型都可以用经济损失等价。首先根据对象的不同,将损失分为两类:

(1)工程直接损失 $L_1$ 。爆炸是瞬间的作用过程,短时间内就会对工程与周边设施、人员造成巨大的伤害,为此将这类损失定义为工程直接损失。根据损失的对象不同,分为工程自身损失 $L_{11}$ 、周边环境损失 $L_{12}$ 两种。工程自身损失主要是指工程结构破坏、附属设备损毁、内部人员伤亡等。周边环境损失是爆炸灾害造成的工程外的一些损失,包括周边建筑物毁坏、人员伤亡等。初次爆炸带来的直接损失通常与时间无关,但是在爆炸灾害发生后,可能随时间不断演化,会带来更大的损失,比如某输气管线被爆炸破坏后,可能导致管线内危险气体泄漏到外部空间,通过一定量的聚集点燃,引发二次爆炸,带来更大损失,这类损失也属于直接损失,与次生灾害阻断时间有关的,阻断越早,危险性越小,损失也越小。

(2)工程间接损失 $L_2$ 。工程设施作为社会或城市体系的重要组成部分,由于工程功能的损失,必然会对体系功能造成一定的影响,比如某桥梁毁坏对城市交通的影响,某电站毁坏对城市用电的影响,或者某军事设施毁伤对军事行动的影响,这类影响与时间密切相关,恢复时间越长,影响越大。恢复能力的大小也决定了这类损失的降低程度。

韧性指数表示如下:

$$R = 1 - \sum_{i=1}^n P(E_i) L_T(E_i) / V_T \quad (3)$$

式中: $E_i$ 为第 $i$ 等级爆炸强度; $P(E_i)$ 为第 $i$ 等级爆炸强度发生的概率; $L_T(E_i)$ 为第 $i$ 等级爆炸强度发生时造成的工程总损失; $V_T$ 为工程总价值,包括工程范围内的设施、人员、内部设备以及工程对外部系统的功能价值。

$$V_T = V_1 + \Delta V t_{lc} \quad (4)$$

式中: $V_1$ 为工程自身总价值; $\Delta V$ 为单位时间内该工程对外部系统的功能价值,可以通过工程功能完全丧失时单位时间内造成的损失量来计算。

工程总损失计算公式如下:

$$\begin{cases} L_T(E_i) = L_1(E_i, Q_1) + L_2(E_i, Q(t)) \\ L_2(E_i) = \int_{t_{oc}}^{t_{oc} + t_{lc}} \Delta L_2(E_i, Q(t)) dt \end{cases} \quad (5)$$

式中: $L_1(E_i, Q_1)$ 为第*i*等级爆炸强度下工程直接损失,与爆炸事故发生时性能下降水平 $Q_1$ 有关; $L_2(E_i, Q(t))$ 为第*i*等级爆炸强度下工程间接损失; $\Delta L_2(E_i, Q(t))$ 为第*i*等级爆炸强度下单位时间内工程间接损失率,两者都与恢复过程中性能 $Q(t)$ 有关。

图7给出了某工况下损失的时程变化与性能变化对比示意图,图7a为性能变化曲线,图7b为累计损失变化曲线,纵坐标为损失比,即损失量与总价值之比。假设工程恢复是间断性恢复模式,间接损失与时间呈线性关系。在 $t_{oe}$ 时刻,爆炸事件发生,此时结构性能下降至 $Q_1$ ,带来的直接损失为 $L_1$ ,此后结构性能逐渐恢复,间接损失 $L_2$ 增长率 $k=\Delta L/\Delta t$ 与该时刻的结构性能有关,结构性能恢复得越高,增长率越小,但由于结构没有完全恢复, $L_2$ 不断增加,直至 $t_{re}$ 时刻功能完全恢复,此时造成的总损失比为 $[L_1+L_2(t_{re})]/V_T$ 。

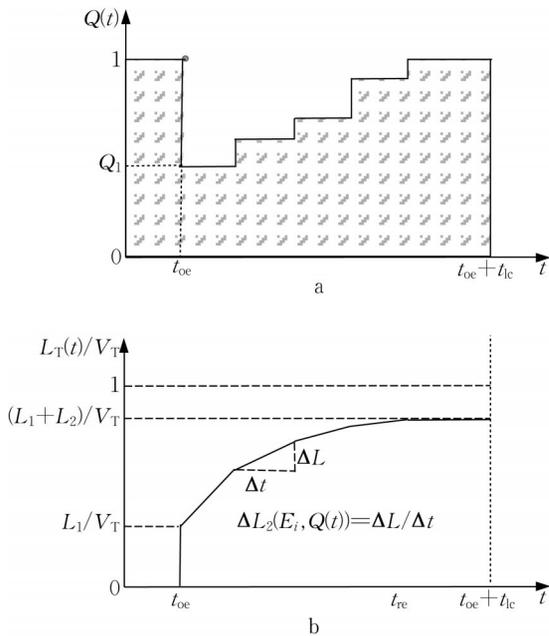


图7 损失的时程变化与性能变化对比示意图

Fig.7 Comparison of time history change and performance change of loss

基于公式(3),一方面可以获得工程韧性指数,另外一方面可以用来进行优化决策。第*j*个韧性设计方案取得的收益率可由公式(6)计算。

$$\Pi_j = \frac{(R_j - R_0)V_T}{(C_j - C_0)} \quad (6)$$

式中: $R_j$ 为利用公式(3)计算出的第*j*个韧性设计方案韧性指数; $R_0$ 为传统设计方案韧性指数; $C_j$ 为第*j*个韧性设计方案的建设与恢复成本; $C_0$ 为传统设计方案的建设与恢复成本。

公式(6)中第一项为韧性设计相对于传统设计方法所取得的收益(预期损失降低量),第二项是韧性设计相对于传统设计方法总成本的增加量。若 $\Pi_j$ 大于1,则表示收益大于花费,该方案可选择。对于多个可选择的方案, $\Pi_j$ 越大,表示单位成本投入取得的收益越大,选择的可能性也越大。

## 5 重大基础设施抗爆韧性发展建议

(1)加强重大工程抗爆韧性技术支撑体系研究。重大工程设施涉及能源、交通、制造、军事等多个领域,工程结构形式、目标功能特性各异,爆炸毁伤机制复杂,有效分析重大工程爆炸毁伤全过程,快速精准预测工程的爆炸灾害后果,智能识别毁伤构件是推进工程抗爆韧性实现的基础。抗爆韧性设计以控制爆炸灾害后果,提升工程功能可恢复能力为主要目标,传统整体抗力型设计难以满足快速恢复的要求,需要从材料、结构到体系进行技术重构,发展完善包括爆炸威胁智能感知响应、吸能耗能自适应自修复材料、轻量化模块化装配式结构等先进技术以实现工程自我保护与快速恢复能力的综合提升。

(2)加快工程抗爆韧性定量评估方法研究。建立合理有效的韧性评估方法是韧性设计有效应用与推广的理论基础,韧性评估涉及爆炸灾害危险性评估、工程结构易损性评估、恢复力评估等多阶段多要素评估,需在充分考虑经济性与韧性平衡的基础上,建立包括经济损失、人员伤亡、环境影响等多种类型在内的损失计算模型,提出基于多元数据的工程抗爆韧性评估方法,构建结构、工程、体系多层次综合评价方法。

(3)加快重大工程抗爆韧性数据决策平台建设。重大工程设施涉及类型多,韧性设计需考虑材料、结构、地质、地理等多方面因素,与技术、经济密切相关,亟需构建重大工程爆炸毁伤分析数据库,为爆炸灾害下工程目标易损性分析提供基础数据支撑。需要考虑威胁环境动态变化、关键设施爆炸毁伤、网络拓扑结构突变、级联失效扩展蔓延等因素,构建具有自学习、自适应、持续进化与推演等能力的群智计算空间,推动大规模重大工程设施体系在平战多灾害不确定性扰动和复杂耦合情况下防护资源自进化动态配置能力的形成。

(4)选择典型重大工程并开展抗爆韧性设计示范应用,推进相关标准规范制定。鉴于重大基础设施韧性设计的必要性和紧迫性,结合经济性考虑,可

在我国重点城市选择几个典型重大工程(过江隧道、大型输气管线等)先期开展研究并进行应用示范,在此基础上,结合重要经济目标等防护建设发展需求,推动抗爆韧性设计相关标准规范的制定。

#### 作者贡献声明:

卢浩:文章统筹,论文撰写。

陈丹鹤:协助撰写论文,分析模型,论文修改。

邓树新:协助撰写论文。

熊自明:论文修改,文件整理。

王明洋:文章统筹,论文内容确定,论文修改。

#### 参考文献:

- [1] SPUR. The resilient city. Defining what San Francisco needs from its seismic mitigation policies [R]. San Francisco: The San Francisco Planning and Urban Research Association, 2009.
- [2] MIELER M W. Toward resilient communities. A performance-based engineering framework for design and evaluation of the built environment [D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2012.
- [3] NIST. Community resilience planning guide for buildings and infrastructure systems volume i [R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2015.
- [4] MAYES R, REIS E. The US resiliency council and the building rating system [C]// Proceedings of the 2nd Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. San Francisco: The Applied Technology Council and the Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, 2015: 754-764.
- [5] 吕西林. 可恢复功能防震结构——基本概念与设计方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019  
LÜ Xilin. Recoverable function shockproof structure-basic concept and design method[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019
- [6] 吕西林, 武大洋, 周颖. 可恢复功能防震结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 1.  
LÜ Xilin, WU Dayang, ZHOU Ying. State-of-the-art of earthquake resilient structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 1.
- [7] 吕西林, 陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 27.  
LÜ Xilin, CHEN Cong. Research progress in structural systems with replaceable members [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 27.
- [8] 赵旭东, 陈志龙, 龚华栋. 关键基础设施体系灾害损伤恢复力研究综述[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 62.  
ZHAO Xudong, CHEN Zhilong, GONG Huadong, *et al.* Review on the study of disaster resilience of critical infrastructure systems [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 30(12): 62.
- [9] 李强, 陈志龙, 赵旭东. 地震灾害下城市生命线体系恢复力双维度综合评估[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2): 65.  
LI Qiang, CHEN Zhilong, ZHAO Xudong. Seismic resilience assessment of urban lifeline systems: a double-dimensional approach [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(2): 65.
- [10] 郑刚, 程雪松, 周海祚. 岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J]. 土木工程学报, 2022, 55(7): 1.  
ZHENG Gang, CHENG Xuesong, ZHOU Haizuo, *et al.* Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(7): 1.
- [11] 党爱国, 王坤, 郭彦朋. 防护工程韧性原理及启示[J]. 防护工程, 2020, 42(4): 67.  
DANG Aiguo, WANG Kun, GUO Yanpeng, *et al.* Mechanism of protective engineering resilience and relevant revelations [J]. Protective Engineering, 2020, 42(4): 67.
- [12] 吴斌. 北溪管道爆炸撼动全球能源版图 俄欧“能源纽带”何处去? [N]. 21世纪经济报道, 2022-09-29(3).  
WU Bin. The explosion of the Nord Stream pipeline shakes the global energy map. Where is the Russian-European “energy link”? [N]. 21st Century Business Herald, 2022-09-29(3).
- [13] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1.
- [14] CARL F. Resilience: the emergence of a perspective for social - ecological systems analyses [J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 253.
- [15] PAOLO B, DAN M F, THOMAS U, *et al.* Resilience and sustainability of civil infrastructure: toward a unified approach [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2014, 20(2): 04014004
- [16] 唐彦东, 张青霞, 于汐. 国外社区韧性评估维度和方法综述[J]. 灾害学, 2023, 38(01): 141.  
TANG Yandong, ZHANG Qingxia, YU Xi. Review of foreign community resilience assessment dimensions and methods [J]. 灾害学, 2023, 38(01): 141.
- [17] 丛阳, 余丁浩, 李钢. 城市综合体多层级功能损失及抗震韧性评估方法[J/OL]. 建筑结构学报: 1-15. DOI: 10.14006/j.jzjgxb. 2022.0155.  
CONG Yang, YU Dinghao, LI Gang, *et al.* Multi-level function loss and seismic resilience assessment method of urban complex [J/OL]. Journal of Building Structures: 1-15. DOI: 10.14006/j.jzjgxb. 2022.0155.
- [18] 张娟, 张明媛, 李钢. 地震灾害作用下老旧建筑群韧性评估与提升[J]. 土木工程学报, 2022, 55(1): 41.  
ZHANG Juan, ZHANG Mingyuan, LI Gang, *et al.* Seismic resilience evaluation and improvement of old buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(1): 41.
- [19] 康现栋, 付皓然, 赵光. 单体建筑抗震韧性评估方法研究与应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(8): 37.  
KANG Xiandong, FU Haoran, ZHAO Guang, *et al.* Reseand applicaon of evaluation methods for earthquake resilience of individual building structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(8): 37.
- [20] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience [J]. Elsevier, 2010, 32(11): 3639.