孙纬宇,吴小乐,朱辉,等.隧道工程抗震韧性评估及提升研究进展[J].地震工程学报,2026,48(5):1001-1017.DOI:10.20000/j.1000-0844.20251121002

SUN Weiyu,WU Xiaole,ZHU Hui,et al.Research progress on seismic resilience assessment and enhancement of tunnel engineering[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1001-1017.DOI:10.20000/j.1000-0844.20251121002

隧道工程抗震韧性评估及提升研究进展

孙纬宇[1,2],吴小乐[1],朱 辉[1],汪 波[1,3],种文帅[1],梁庆国[1,2]

(1.兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070;
2.西部铁路站桥隧绿色智能建维韧性与安全铁路行业工程研究中心,甘肃 兰州 730070;
3.西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:隧道抗震研究是地下工程防灾减灾领域的核心议题之一。韧性理念为隧道系统的抗震安全分析与性能提升提供了新视角。文章系统综述隧道抗震韧性的评估方法与提升策略研究进展。首先,阐释韧性概念从生态学到工程领域的演进历程,明确隧道抗震韧性是抵御震害与快速恢复功能的核心内涵;其次,系统归纳韧性评估的数学模型与情景化工程评估框架,构建隧道抗震韧性评估技术体系;进而,从抗力韧性与恢复韧性两个维度,分别探讨增强隧道本体与界面抗损能力的技术措施,以及提升震后功能恢复效率的设计策略;最后,指出现有研究在模型适用性、多灾种耦合及全生命周期成本分析等方面的局限,并对智能化、系统化的发展趋势进行展望。研究可为隧道工程抗震韧性的理论发展与工程实践提供系统性参考。

关键词:隧道抗震;韧性评估;韧性提升

中图分类号:TU94;TU352.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1001-17

DOI:10.20000/j.1000-0844.20251121002

Research progress on seismic resilience assessment and enhancement of tunnel engineering

SUN Weiyu[1,2], WU Xiaole[1], ZHU Hui[1], WANG Bo[1,3], ZHONG Wenshuai[1], LIANG Qingguo[1,2]

(*1.School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;*
2.Research Center for Resilience and Safety in Green, Intelligent Construction, Operation and Maintenance of Railway Stations, Bridges and Tunnels for Railway in the Western Region, Lanzhou 730070, Gansu, China;
3.Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Seismic resilience of tunnels is a core research topic in underground engineering disaster prevention and mitigation. The concept of seismic resilience offers a new paradigm for seismic safety analysis and performance optimization of tunnel systems. This article systematically reviews the

收稿日期:2025-11-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52568059,U2569206,U2468217);甘肃省高校教师创新基金项目(2026A-043);甘肃省青年人才项目(2026QNGR025)

第一作者简介:孙纬宇(1988-),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事隧道与地下工程抗震方面的科研与教学工作。E-mail:sunwy_11@163.com。

assessment methods and enhancement strategies of seismic resilience in tunnel engineering. First, it expounds on the evolutionary process of the concept of seismic resilience from the ecological field to the engineering field and clarifies the core connotation of tunnel seismic resilience: the ability to resist seismic hazards and rapidly restore structural functions. Second, it systematically generalizes the mathematical models and scenario-based engineering evaluation frameworks for resilience assessment and constructs a technical system for evaluating tunnel seismic resilience. Further, from the two dimensions of resistance and recovery resilience, it explores the technical measures to enhance the damage resistance of tunnel bodies and their interfaces and design strategies to improve the efficiency of post-earthquake functional recovery. Finally, the limitations of existing studies are highlighted in terms of model applicability, multihazard coupling effects, and life cycle cost analysis, and the development trends toward intelligentization and systematization are prospected. This article is intended to provide a systematic reference for the theoretical advancement and engineering practice of seismic resilience in tunnel engineering.

Keywords: tunnel seismic resistance; resilience assessment; resilience enhancement

0 引言

地震是突发性强、破坏性大的自然灾害,对人类社会威胁巨大[1]。我国位于环太平洋地震带与欧亚地震带之间,地震活动频繁,是地震灾害最严重的国家之一。历史上,汶川、玉树、雅安、鲁甸等地发生的强震均造成了严重的生命财产损失。

地铁隧道与山岭隧道是交通基础设施的核心组成部分,前者是城市生命线工程的关键单元,后者是跨区域高等级交通的重要廊道,二者功能的持续保障具有重要战略意义。隧道震损不仅会直接造成交通中断,还会引发救援通道受阻、应急运输停滞等连锁灾害。2008年汶川地震、2011年东日本大地震及2022年门源地震均造成隧道衬砌破坏、接头错动、轨道变形等严重震害[2-4],凸显出提升隧道抗震韧性的迫切需求[5-6]。

隧道结构在强震作用下易丧失稳定性与通行功能,其灾害脆弱性已成为制约地下结构安全运营的瓶颈。同时,隧道震后修复存在难度大、周期长、成本高的特点。因此,提升隧道在地震作用下的功能保持与快速恢复能力,即强化其抗震韧性,是提高交通基础设施综合防震减灾能力的重要途径[7]。

本文系统梳理了隧道抗震韧性的概念演进、评估方法及抗力与恢复韧性提升路径等方面的研究进展,并对未来研究方向进行展望,以期为相关理论研究与工程实践提供参考。

1 韧性的概念及发展

韧性概念起源于生态学领域,由Holling[8]首次提出,用于描述生态系统吸收扰动并维持核心功能的能力。该概念随后被引入社会系统研究,Timmerman[9]将其拓展为社会系统应对灾害的适应能力,突出恢复过程的动态特性。21世纪初,韧性理论开始在工程领域系统化应用,美国布法罗大学的Bruneau等[10]提出基础设施韧性的鲁棒性、冗余性、资源性和快速恢复性四大支柱,构建了抗震韧性的概念框架。工程韧性被定义为系统在干扰前后及过程中适应、维持功能、保持可行性的能力[11]。在现代系统日趋复杂、威胁多样的背景下,工程韧性对保障关键基础设施运行、维护国家安全与保护生命财产安全具有重要意义[12]。

我国《建筑抗震韧性评价标准(GB/T 38591—2020)》[13]与《城市工程系统抗震韧性评价导则(RISN-TG 041—2022)》[14]分别明确了建筑与城市工程系统的抗震韧性定义及评价方法[15]。学界对工程抗震韧性的界定各有侧重,Bruneau等[10]将其定义为震前减损、震后降害与快速恢复的综合能力;路德春等[16]则把地下结构抗震韧性划分为抗力韧性与恢复韧性,认为该划分更贴合工程实际。在地下结构抗震韧性研究中,抗力韧性指结构抵御震害、震后维持基本功能的能力;恢复韧性指震后功能恢复的能力与效率,以恢复时间和修复费用为核心表征指标[17]。Walker等[18]进一步拓展了韧性范

畴，认为韧性不仅包含系统恢复至初始状态的能力，还涵盖系统的改进、适应和转变能力。为实现结构抗震韧性的量化分析，González 等[19]提出了考虑所有可能地震影响的韧性分析方法，其内容涉及灾害定义、结构易损性计算、地震风险评估、修复方案制定及修复时间评估等方面。

随着研究的深入，韧性概念在不同系统中得到细化。隧道等地下结构具有环境耦合性、功能复杂性、修复局限性等特点，正是这些特殊性推动了韧性研究的深化[20]。郑刚等[21]在构建工程结构系统韧性框架中提到，可恢复性是指“地下工程结构承受极端作用的能力以及通过加固补救措施快速恢复到原有服役性能的能力”。Khetwal 等[22]针对交通隧道开展了韧性分析，其将交通隧道韧性定义为隧道维持原有交通流量且最小化社会和经济损失的能力，并讨论了运营期隧道监测数据对隧道性能损失模型的作用，为后期开展系统韧性分析奠定了基础。肖明清等[23]将盾构隧道结构韧性定义为主体结构在预期破坏下承受灾害冲击和快速修复的能力。当前，隧道抗震韧性更明确的定义为：隧道系统在地震等扰动下，通过材料创新、结构优化与智能运维的协同机制，实现工程安全、功能连续、社会稳定及生态平衡的动态平衡。这一演进过程体现了从“被动抗灾”到“主动恢复”、从“结构中心”到“系统耦合”的转变，为韧性理论在隧道抗震领域的应用提供了深化方向。

2　抗震韧性评估模型及框架

科学准确地评估隧道抗震韧性，是实现韧性设计、优化加固策略、支撑灾后快速恢复决策的根本前提与核心环节[24]。抗震韧性评估需综合考量安全性、功能性等多维目标，并应对地震动、地质环境等多源不确定性。同时，由于隧道具有独特的受力机理与失效模式，单一评估方法难以全面刻画其真实韧性水平，因此，构建系统化、可操作的评估体系至关重要。本节从量化模型、情景化框架、工程应用、数字化赋能、场景适配及精度提升六个方面，系统阐述隧道抗震韧性评估技术体系。

2.1　韧性量化模型

韧性量化模型是评估的理论根基，它通过数学模型将抽象的韧性转化为可计算、可比较的量化指标。恢复模型作为核心组成部分，其量化结果与经济状况、技术水平、应急资源及政府决策密切相关，也与地震造成的直接、间接损失高度关联。

目前具有代表性的韧性量化方法主要分为两类，分别是确定性韧性度量方法和考虑不确定性的韧性度量方法[25-26]。各类度量方法还可根据是否考虑时间因素作进一步细分，如表 1 和表 2 所列。

确定性模型（以性能影响函数法、韧性三角形度量法为代表）具有计算简洁、参数易于获取、结果直观可比较的优点，但难以考虑随机因素，且无法充分反映震后动态恢复过程，因此适用于数据匮乏、初步评估或结构形式相对简单的圆形隧道；考虑不确定性的模型（动态韧性、概率性韧性度量法）更符合工程实际，但存在计算复杂、对数据要求高、参数校准困难等挑战，更适用于地质条件复杂、风险等级高的隧道。

然而，上述两类模型均源于通用基础设施研究，尚未充分适应隧道工程的特殊性，其局限性主要体现在：一是未充分考虑隧道-围岩的动态耦合效应，难以体现围岩失稳引发的连锁影响[20]；二是对恢复过程过度简化，缺乏对修复时间、空间与工序约束的考量，导致量化偏差较大[39]；三是多以单一结构性能指标为核心，未能全面覆盖通风、照明、排水等附属系统的功能韧性需求[23]。因此，结合隧道工程具体特征，精准选用并进一步优化现有评估模型，是提升抗震韧性评估准确性与结果可信度的关键。

2.2　基于情景的工程韧性评估模型

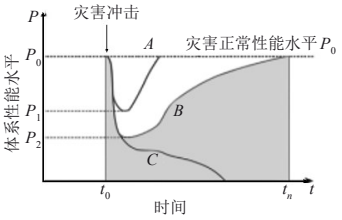
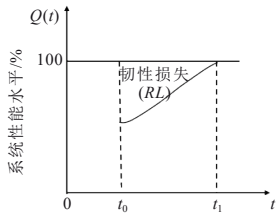
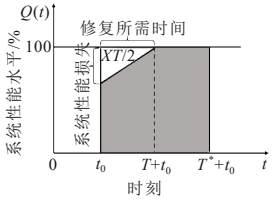
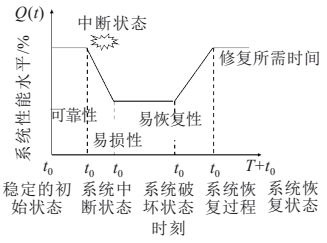
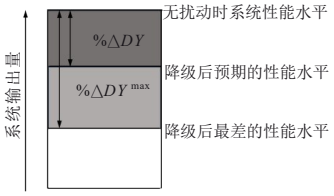
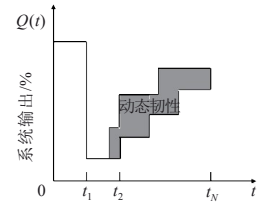
量化指标需置于具体的地震灾害情景中进行分析。采用韧性量化模型进行评估前，需要处理数学模型与实际工程情况中存在的不确定性和模糊性问题[40]。因此，国内外学者建立了多种工程韧性评估模型，主要可分为模糊逻辑模型和仿真模型两类[41]。

模糊逻辑模型由概率性韧性定量评估方法衍生而来，主要以概率论方法开展韧性计算。在样本充足时，该模型的计算结果更贴近系统真实性能，但其仍无法完全反映真实的系统性能，且通常不适用于单体系统的评估。仿真模型可对系统性能进行动态仿真，能够解决韧性评价难以量化系统实际运行机理的问题。该类模型适用灾害类型广泛，无论自然灾害还是人为灾害均适用，但其具体适用范围受模型限制，并非所有系统都有适配的仿真模型。表 3 列出了部分典型的工程韧性评估框架。

模糊逻辑模型适合处理围岩等级、损伤程度等

表 1 确定性韧性度量方法

Table 1 Deterministic resilience quantification methods

编号	量化数学模型	公式	参数说明	示意图
1	性能影响函数法（Performance Recovery Function，PRF）[27]（赵旭东等，2017）	$R=\frac{A_F}{A_N}=\frac{\int_{t_0}^{t_N}F(t)\mathrm{d}t}{\int_{t_0}^{t_N}N(t)\mathrm{d}t}$	$F(t)$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，一般作常数化处理	
2	韧性三角形度量法[10]（Bruneau等，2003）	$RL=\int_{t_0}^{t_1}\left[100-Q(t)\right]\mathrm{d}t$	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	
3	改进型韧性度量法[28]（Zobel等，2014）	$R(X,T)=\frac{T^*-X\frac{T}{2}}{T^*}\times 100\%$ $=(1-\frac{TX}{2T^*})\times 100\%$	$X\in[0,1]$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	
4	时间指标韧性度量法[29]（Whitson等，2009）	$R(t\mid e^j)=\frac{\varphi(t\mid e^j)-\varphi(t_d\mid e^j)}{\varphi(t_0)-\varphi(t_d\mid e^j)}$	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	
5	瞬时韧性度量法[30]（Orwin等，2004）	$resilience=\frac{2\times\lvert E_{\max}\rvert}{\lvert E_{\max}\rvert+\lvert E_j\rvert}-1$	$E_{\max}$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	无
6	确定性静态韧性度量法[31]（Rose等，2005）	$R=\frac{\%\Delta Y^{\max}-\%\Delta Y}{\%\Delta DY^{\max}}$	$\%\Delta DY$为系统输出可能出现的最大下降量；$\%\Delta Y^{\max}$为系统输出实际下降量	
7	确定性动态韧性度量法[32]（Rose，2007）	$DR=\sum_{i=1}^{N}\left[SO_{\mathrm{HR}}(t_i)-SO_{\mathrm{WR}}(t_i)\right]$	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	

模糊不确定的指标，且对实测数据要求不高，因此更适用于区域隧道网络或多目标综合评估。然而，在样本不足时，其计算结果的偏差可能较大，难以满足单体隧道精细化评估需求。

仿真模型能精准模拟多灾害、多工况下的系统响应，适用于特殊隧道或关键断面的韧性评估，并能兼容人为与自然灾害分析。但其应用通常需要专用模型、计算耗时且依赖专业软件，存在一定局限性。其中，离散事件模拟、蒙特卡洛模拟等方法能够精细刻画隧道损伤演化、修复资源调度及功能

表 2　考虑不确定性的韧性度量方法

Table 2　Resilience quantification methods considering uncertainty

编号	量化数学模型	公式	参数说明
8	动态韧性度量法[33]（Francis 等，2014）	$\rho_i = S_p \dfrac{F_r F_0}{F_d F_0}$ $S_P = \begin{cases} \dfrac{t_\delta}{t_r^*}\exp\left[-a\left(t_r - t_r^*\right)\right], \left(t_r \geqslant t_r^*\right) \\ \dfrac{t_\delta}{t_r^*}, \left(t_r < t_r^*\right) \end{cases}$	事件 i 的对应条件为：S_p 为恢复速度；F_0 是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_δ 表示灾后可接受的最大恢复时间；t_r 表示最终恢复的时间或达到新平衡状态的时间；t_r^* 表示完成初始恢复动作的时间；a 为控制韧性“衰减”直至达到新平衡的参数
9	概率性韧性度量法[34]（Chang 等，2004）	$R = P\left(A \mid i\right) = P\left(r_0 < r^* \text{且} t_0 < t^*\right)$	A 为集合的性能标准；r^* 为系统性能的最大可接受损失；t^* 为最大可接受恢复时间
10	改进型概率性韧性度量法[35]（Youn 等，2011）	$\Psi(resilience) = R(reliability) + \rho(restoration)$ $\rho = P(E_{mr}\|E_{cp}E_{cd}E_{sf}) \times P(E_{cp}\|E_{cd}E_{sf}) \times P(E_{cd}\|E_{sf}) \times P(E_{sf})$	韧性定义为系统可靠恢复的程度，包含系统故障事件 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
11	多灾害韧性度量法[36]（Ouyang 等，2012）	$AR = E\left[\dfrac{\int_0^T P(t)\mathrm{d}t}{\int_0^T TP(t)\mathrm{d}t}\right] = E\left[\dfrac{\int_0^T TP(t)\mathrm{d}t - \sum_{n=1}^{N(T)} AIA_N(t_n)}{\int_0^T TP(t)\mathrm{d}t}\right]$	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；$AIA_n(t_n)$ 为第 n 次事件中 $P(t)$ 和 $TP(t)$ 之间的面积，其中 n 为事件序列，t_n 为描述第 n 次事件发生时间的随机变量
12	空间分布韧性度量法[33]（Francis 等，2014）	$F = \dfrac{1}{P_D E_D}\int_0^{P_D} E(P_r)\mathrm{d}P_r$	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
13	随机性指标度量法[37]（Ayyub，2014）	$R_c = \dfrac{T_i + F\Delta T_f + R\Delta T_r}{T_i + \Delta T_f + \Delta T_r}$ $R = \dfrac{\int_{t_i}^{t_r} r\mathrm{d}t}{\int_{t_i}^{t_r} Q\mathrm{d}t}$，$\mathrm{F} = \dfrac{\int_{t_i}^{t_r} f\mathrm{d}t}{\int_{t_i}^{t_r} Q\mathrm{d}t}$	R_c 为韧性；T_i 为事故发生时间；T_f 为故障开始时间；T_r 为恢复完成时间；$\Delta T_f = T_f - T_i$，为故障持续时间；$\Delta T_r = T_r - T_f$，为恢复持续时间
14	理想状态韧性概率度量法[38]（Hashimoto 等，1982）	$R = P\{S(t+1) \in NF \mid S(t) \in F\}$	$S(t)$ 为系统在 t 时刻的状态；NF 为非故障状态（理想状态）；F 为故障状态

恢复的全过程，常用于评估修复策略与交通网络的级联效应。然而，高保真建模的成本较高，且模型验证依赖于详实的实测数据。

综合考虑，隧道抗震韧性评估宜采用模糊逻辑与仿真模型相结合的混合框架：即以模糊逻辑处理不确定性与多源知识的融合，利用数值仿真模拟损伤及恢复的具体情景，再结合韧性量化模型输出评估结果。该方法兼顾评估的可靠性与可操作性，并已通过多类隧道工程的实践验证，具备实际应用价值。

2.3　抗震韧性评估的应用

地震后的功能评估通常包含组件功能、系统功能和功能关联性三个层次，如图 1 所示。隧道抗震韧性评估以组件功能评估为基础，并延伸至系统功能评估。组件功能评估侧重于隧道主体、附属结构等基础单元的震后损伤程度与功能状态；系统功能评估关注隧道作为交通系统单元的协同运行能力；功能关联性评估则着重分析隧道失效对周边交通、生命线等系统产生的连锁影响。

隧道震后功能评估目前以组件功能和系统功能研究最为集中。针对隧道本体结构性，学者们从不同角度提出了适用于不同场景的韧性评估方法。Shen 等[50]提出了基于云模型的隧道抗震韧性评估方法，该方法整合了有限元法、地震衰减模型、客观-

表 3 工程韧性评估框架

Table 3 Engineering resilience assessment framework

模型类别	提出者及时间	模型方法	核心思想	适用范围
模糊逻辑模型	Muller (2012)[42]	关键重大工程韧性模糊体系结构	基于概率性韧性评估方法，采用模糊逻辑体系对关键基础设施韧性进行量化评估	综合类工程（如关键重大工程）
模糊逻辑模型	Azadeh 等 (2014)[43]	模糊认知图韧性影响因素评价法	通过模糊认知图对工程韧性的关键影响因素进行量化评价	工程系统韧性影响因素分析
模糊逻辑模型	Saaty (1977)[44]	模糊层次分析法	将复杂决策问题分解为多层次指标，通过两两比较确定指标权重的量化分析方法	决策要素和判断难以精确量化、依赖专家经验或语言描述、需整合群体意见的复杂多准则决策问题
模糊逻辑模型	Li (1995)[45]	云模型	处理不确定性和模糊性，实现定性概念与定量描述之间的转换	描述概念的模糊性（亦此亦彼）和随机性（偶然性）共存的关联关系，适用于二者共存的问题
仿真模型	Albores 等 (2008)[46]	离散事件模拟模型	模拟恐怖袭击等事件下消防救援部门的应急响应过程，评估系统应对人为灾害的韧性	人为灾害（如恐怖袭击）下的应急响应系统（如消防救援）
仿真模型	Jain 等 (2010)[47]	蒙特卡罗模拟方法	采用蒙特卡罗模拟，通过大量随机抽样研究水库系统在不同情景下的性能与韧性	水利工程（如水库系统）
仿真模型	Sterbenz 等 (2010)[48]	集成分析仿真、拓扑生成与专家心理仿真方法	融合多种仿真技术，综合评估与提升网络系统在扰动下的韧性	网络系统（如通信网络）
仿真模型	Adjetey-Bahun 等 (2016)[49]	时间依赖的仿真模型	基于时间维度动态模拟铁路运输系统受扰后的性能变化，以衡量其韧性指标	铁路运输系统

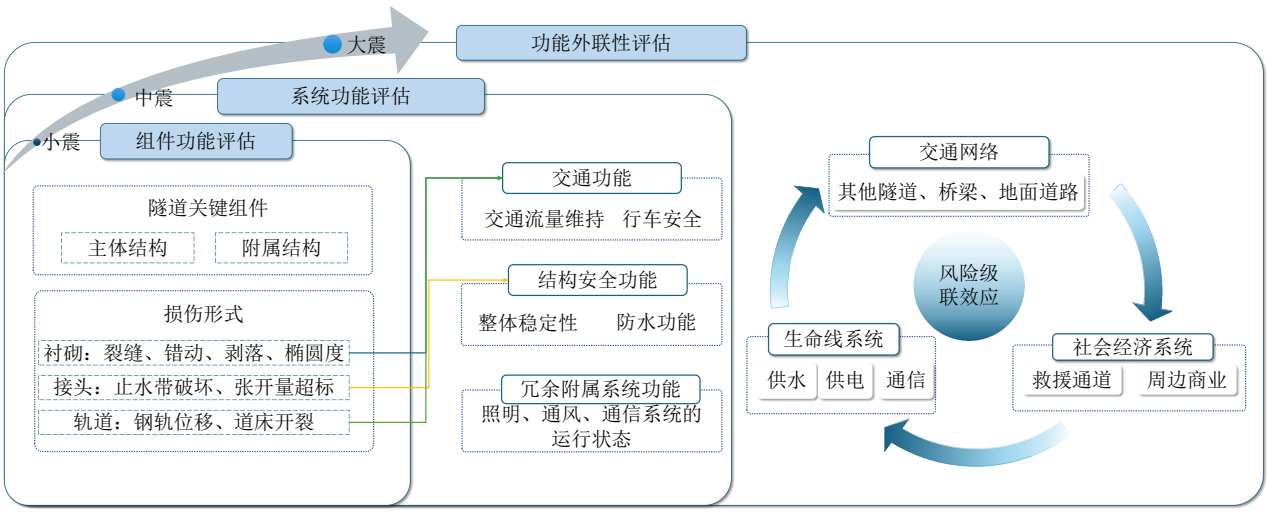


图 1 功能评估层次

Fig. 1 Functional assessment hierarchy

主观组合权重法、决策实验室法及博弈论以确定权重，通过对比标准与评估云模型的相似度确定稳健性等级，再结合该等级和修复函数量化修复时间，为地下结构抗震韧性评估提供了框架。Huang 等[51]提出了地震作用下隧道韧性评估框架，结合脆弱性函数和恢复函数，评估了不同地震场景下隧道的稳健性及不同损伤水平的恢复速度，并已应用于冲积沉积物中的圆形隧道案例。李心熙等[52]构建了沉管隧道纵向抗震韧性评估方法及流程，建立了考虑结构特征与接头构造的分析模型，通过地震易损性分析和性能恢复模型计算韧性指数，实现了隧道抗震韧性评价。倪鑫[53]基于结构椭圆度提出了黄土地区盾构隧道韧性评价方法，分析了堆载和地震作用下的韧性变化规律，为相关研究提供了参考。甘彬霖等[54]采用层次分析法，构建了涵盖结构性能、修复费用、影响时间的盾构隧道韧性综合评价体系，通过 1～9 标度法和专家信心指数法构建指标重要性判断矩阵并计算权重，经案例验证了方法的合理性，为恢复韧性量化评估提供了有效工具。

跨断层隧道韧性评估需兼顾非本体因素。

Huang等[4]依托2022年门源M_w6.7地震中大梁高铁隧道案例，采用层次分析法确定了8项抗震韧性指标的权重，结合模糊综合评价法对38个典型震害断面进行了评估，探究了跨断层高铁隧道的震害机制与韧性评估方法。Meng等[55]采用间接边界元-有限元耦合方案，结合随机森林算法代理模型，提出了考虑地形放大效应和隧道-土体动力相互作用的山地隧道近断层地震快速韧性评估框架。张恒等[56]为探究轨道在断层错动位移下的力学响应与变形机制，依托隧道精细模型，开展了走滑断层作用下轨道受力变形的专项研究，为跨断层隧道数值模拟及韧性评估提供了计算依据。

隧道作为地下交通系统核心组成，需在单体韧性评估基础上开展系统层面评估。Huang等[57]系统梳理了地震、洪水、地面沉降等灾害对地下管网、隧道、地铁站的复合影响，指出风险级联效应是当前研究的薄弱环节。Cui等[58]基于易损性分析和加权拓扑图等方法，完成了整个地铁系统抗震性能评估。Saadat等[59]采用图论和网络拓扑方法，对美国华盛顿地铁网络开展了极端事件下的韧性分析，考虑了车站与区间隧道失效两种情景，通过小世界网络方法定量刻画了网络的易损性、效率性及韧性。Zhang等[60]建立了基于网络拓扑法的城区地铁网络灾害韧性分析方法，定量表征了隧道网络易损性及恢复速度，并以含303个车站的上海地铁网络为例进行了实证分析。

隧道韧性不应仅从抗震角度评估，更需从综合层面建立完善的韧性评价体系。白雪[61]结合复杂艰险地区隧道建设特点，构建了安全韧性评价体系，基于模糊层次分析法和逼近理想解法对青藏高原某隧道开展了韧性评估，评估结果与实际情况相符。包艺翔[62]针对公路隧道施工特征，构建了施工安全韧性评价体系，采用组合赋权与模糊综合评价模型对荒竹山公路隧道进行了施工安全评价，并给出了韧性提升措施与建议。魏强等[63]考虑韧性的抵抗性、适应性等属性，建立了包含9个韧性指标的安全评估体系，并在理想模糊物元基础上构建了安全韧性评估模型，以判定韧性等级，该评价方法已在川藏铁路达嘎拉隧道建设中应用。

2.4　数字化与信息化赋能抗震韧性评估

数字化与信息化正推动隧道抗震韧性评估发生革命性变革，使其从传统的人工检测与经验判断，向智能感知、数据驱动与精准评估的方向转变，助力构建高韧性的现代隧道基础设施体系。

人工智能（Artificial Intelligence，AI）与数据驱动方法是实现隧道抗震韧性评估数字化转型的核心动力。其通过整合多源异构监测数据，为隧道结构抗震性能评估开辟了全新技术路径。Su等[64]针对三维地震信号时频特征相关性易丢失的问题，提出了深度残差收缩网络；该方法嵌入软阈值去噪模块与NAMEMD-Duhamel时频分析，无需噪声预处理即可实现大坝抗震损伤等级预测，平均精度达94.52%，为隧道等大型地下结构的快速损伤评估提供了参考。Wang等[65]聚焦于近断层脉冲地震对隧道的破坏机制，采用增量动力分析生成高精度易损性数据，并融合极端梯度提升与随机森林算法筛选脉冲特性、震级等关键影响因素，其二元分类精度达96%；该方法突破了传统易损性分析仅依赖PGA/PGV指标的局限。Malik等[66]提出了物理知情循环神经网络，通过双子网架构嵌入运动方程的物理约束，在有限数据下实现了非线性结构地震响应的实时预测，其误差较纯长短期记忆网络模型显著降低，为复杂隧道结构的实时韧性评估提供了可行方案。

数字孪生技术通过物理-虚拟双向映射与多平台耦合，实现了韧性评估的动态化与智能化。Mokhtari等[67]构建了数字孪生多元素混合模拟框架，基于Prandtl-Ishlinskii滞后模型与稀疏识别技术构建数字孪生体，并结合OpenSees、ABAQUS多平台耦合，解决了多关键构件同时进行物理测试的实验室限制，计算效率较传统混合模拟提升1倍。Qiu等[68]针对预制地下结构节点易损问题，提出“感知-数据-模型-应用”四层数字孪生架构，集成分布式光纤监测与高压注浆修复技术，并通过韧性-时间-成本框架量化修复时间与成本，使结构韧性提升52%、修复成本降低90%，首次实现了节点级韧性的动态评估与修复优化。Dui等[69]创新性地融合生成式AI与数字孪生，构建了地铁隧道系统智能韧性评估平台，通过生成式AI补充极端灾害场景数据，并基于成本重要性排序优化应急修复序列；该平台在单线路故障场景下的韧性值较传统方法提升74.94%，有效解决了复杂网络级联失效下的数据不足问题。

AI、数字孪生等技术在隧道工程中优势显著，但其落地应用仍面临三大核心挑战：一是多源数据获取与融合困难，深部参数监测受限、传感器布设

空间不足、数据时空同步性差，易形成数据孤岛，影响AI模型训练精度；二是模型验证与泛化能力弱，数字孪生精度依赖海量实测数据，而地震下隧道完整损伤数据稀缺，现有AI模型多适配特定地质条件，在复杂场景下泛化能力不足；三是工程落地成本高、技术适配性差，全域感知部署成本高昂，中小型隧道难以承受，且边缘设备兼容性不足，部分AI算法复杂，难以满足震后快速评估的实时性要求。未来可通过研发低成本传感器、突破跨场景数据迁移学习、优化轻量化AI算法等途径来破解这些瓶颈。

2.5 典型场景评估体系适用性讨论

不同隧道场景的地质环境、结构受力特征及功能定位存在显著差异，需针对性优化评估体系的核心指标、模型及方法，以确保评估结果的工程实用性。

2.5.1 山岭隧道评估体系

山岭隧道多穿越软弱围岩、破碎带等复杂地质，洞口段应力集中明显，易发生塌方或剪切破坏。此外，其围岩-结构相互作用强，地震响应受埋深、围岩等级的影响显著，功能以长途交通为主，恢复优先级侧重于实现快速抢通。针对这一特征，评估体系的损伤指标需强化局部与整体评估的结合，即在重点监测洞口段拱肩和拱腰剪切裂缝宽度与深度的基础上，引入地质雷达检测获取的围岩松动圈范围，以补充传统整体位移指标的不足[70]。地震动强度指标应优先选择峰值地面加速度与持时的组合，针对软弱围岩隧道还需额外考虑地震波放大效应，以适配近场脉冲地震的影响[71]。评估模型推荐采用数值模拟与AI校正相结合的方式，即通过模拟围岩-结构相互作用，并结合DRSNet模型快速识别洞口段损伤。该方法可有效缩短评估周期，尤其适用于震后快速决策[64]。

2.5.2 跨断层隧道评估体系

跨断层隧道与普通隧道在抗震韧性方面存在显著差异，主要体现在震害特征、结构变形和修复难度等方面。普通隧道震害多集中于洞口、偏压段及软硬交界段，以洞口边仰坡垮塌、洞门破坏、衬砌裂缝与掉块为主，损伤通常仅涉及衬砌与洞门结构，修复难度相对较低；跨断层隧道受断层蠕滑错动与地震黏滑错动的共同作用，结构非一致变形显著，易出现衬砌剪切错台等严重破坏，如门源地震兰新铁路大梁隧道出现的衬砌剪切错断、基底隆起、轨道扭曲等严重震害，其震损程度高、修复难度大，抗力韧性与恢复韧性均低于普通隧道[72]。

因此，跨断层隧道评估体系的损伤指标应突出断层错动响应，可考虑新增接头张开量、反映错动拉伸与压缩的衬砌轴向应变，以及通过钻孔CT检测获得的断层影响段围岩破碎程度。易损性分析需融入脉冲特性参数，采用XGBoost算法筛选脉冲指标、累积平方速度等关键参数，可显著提高近场地震下的损伤预测精度[65]。评估框架宜采用组件与系统联动的模式，即在组件层面重点评估接头和衬砌的损伤情况，在系统层面聚焦断层错动引发的轨道平顺性等功能中断问题，并结合数字孪生模型模拟错动演化过程[66]。以兰新高铁大梁隧道为例，其作为跨门源断层的典型工程，采用该评估体系后共精准识别出断层影响段38个典型震害断面，为后续临时型钢支撑结合永久抗错衬砌的修复方案提供了重要依据[4]。

2.5.3 城市浅埋隧道评估体系

城市浅埋隧道埋深通常不超过20 m，周边环境复杂，邻近大量建筑物与地下管线，受地面荷载和地震波放大效应影响显著。其功能以城市地铁为主，社会影响敏感，恢复过程需遵循低干扰、快修复的原则，以免影响日间正常运营。评估体系的损伤指标需兼顾结构安全与周边环境影响，除传统的衬砌变形、裂缝监测外，还需新增管线沉降、地面沉降等环境关联指标，如城市浅埋隧道管线沉降控制标准通常不应超过5 mm，地面沉降控制标准需控制在10 mm以内[58]。韧性量化应纳入社会经济损失评估，可采用R-T-C（韧性-时间-成本）框架，该框架能有效量化修复时间对通勤流量的影响，从而补充传统结构性能指标的不足[67]。评估方法优先采用实时监测与快速仿真相结合的方式，即借助物联网技术实时监测轨道几何形位、道床脱空情况，并结合Phy-RNN模型实现地震响应的实时预测。该方法能较好适配夜间“天窗期”的修复决策需求[69]。

2.6 抗震韧性评估准确度的提升方法

韧性评估结果的准确度直接影响工程决策效能。模型简化假定、参数不确定性及数据缺失等因素，易导致评估结果与真实灾害响应存在偏差，进而可能引发加固方案失效或资源错配。提升评估准确度是一项多学科、多环节的系统工程[73]，其核心方法可分为以下四方面，如图2所示。

（1）在细化结构损伤指标方面，可将多维度损

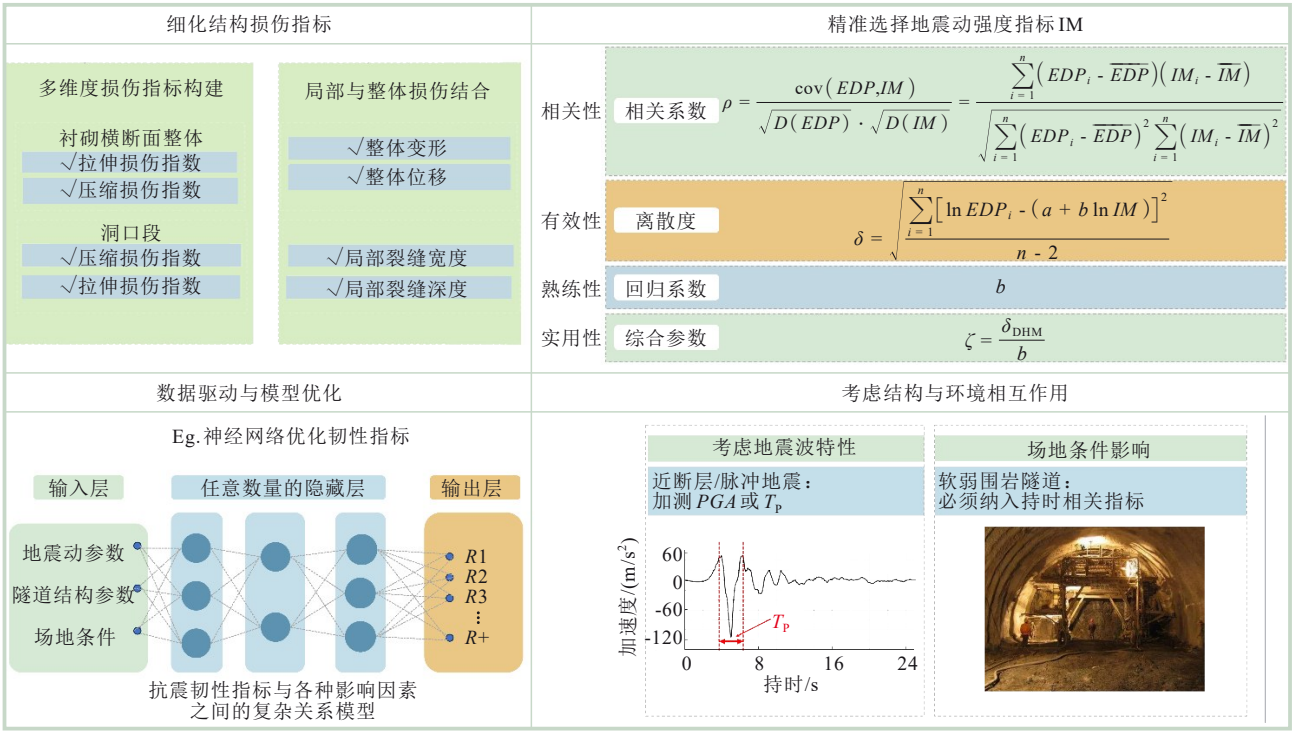


图 2　抗震韧性评估准确度提升方法

Fig. 2　Methods for improving the accuracy of seismic resilience assessment

伤指标的构建与局部、整体损伤评估相结合，实现更全面、精准的评估。当前研究中已有采用衬砌横断面整体压缩损伤指数和拉伸损伤指数作为结构损伤指标来评估衬砌损伤状态的案例。在此基础上，可进一步考虑增加剪切损伤等更多维度[17]。例如，在隧道洞口段等部位，由于地震作用下应力集中，可能出现剪切破坏，因此增加剪切损伤指标能更全面地反映结构损伤。评估时不仅要关注隧道整体性指标（如整体变形、位移等），还应细化到局部关键部位。例如，针对山岭隧道洞口段衬砌结构的拱肩和拱腰等关键部位，可设置专门的损伤指标（如局部裂缝宽度、深度等），以与整体损伤指标形成补充，从而更精准地反映损伤状况[70]。

（2）在精准选择地震动强度指标时，需从相关性、有效性、熟练性和实用性等多方面进行筛选与验证[17]。可通过计算相关系数来衡量地震动强度指标与结构响应的关联程度，以离散度评估指标来预测有效性，借助回归系数体现其熟练性，再结合综合参数考量实用性，从而依据隧道结构特性筛选出适配的地震动强度指标。

（3）在数据驱动与模型优化层面，可依托大数据并结合机器学习算法。利用大数据收集大量隧道在不同地震工况下的实际响应数据，包括结构变形、损伤情况等，同时结合数值模拟生成的数据，运用神经网络、支持向量机等机器学习算法，建立抗震韧性指标与多影响因素之间的复杂关系模型。通过大量数据训练，可挖掘出传统方法难以发现的结构响应与损伤之间的潜在联系，从而优化韧性评估指标[70]。例如，可利用神经网络模型，输入地震动参数、隧道结构参数、场地条件等多源数据，进而输出能更精准反映结构损伤的抗震韧性指标。

（4）在考虑结构与环境相互作用时，需特别关注地震波特性和场地条件的影响。在近场地震中，可能存在脉冲型地震波，对隧道结构产生冲击作用，此时可考虑选择与脉冲特性相关的强度指标（如脉冲持续时间与最大加速度的组合指标等），以更准确地反映地震作用下的结构损伤[71]。针对软弱围岩隧道，则必须纳入持时相关指标，并精准模拟隧道结构与围岩的相互作用，从而真实反映地震作用下的结构响应。

3　隧道抗震韧性提升技术

科学完善的隧道抗震韧性评估模型与框架，可精准量化隧道韧性水平，识别结构在抗力性能与恢复效率上的薄弱环节，为韧性提升提供依据与方向。地下结构抗震韧性可分为抗力韧性与恢复韧

性两个关键维度[74]。抗力韧性体现结构抵御地震、震后维持基本功能的能力,主要依靠自身力学与构造特性减小损伤;恢复韧性则侧重震后功能恢复的能力与效率,以恢复时间和修复费用为核心指标。二者共同构成了结构震后恢复特性的全面表征[75]。下文将从提升抗力韧性与恢复韧性两方面,梳理对应的韧性提升措施。

3.1 隧道结构抗力韧性

隧道结构的韧性并非单一维度属性,而是由衬砌(管片)、现浇混凝土、支护结构等本体结构与隧道-围岩/土体界面共同构成的复杂体系。隧道本体破坏与界面接触状态劣化这两种失效模式相互耦合影响,但其损伤机理、控制因素与增强措施存在本质区别。要系统性提升隧道整体抗力韧性,必须针对这两个核心环节开展深入研究与专项增强。为此,以下分别详细论述隧道本体抗损韧性增强与界面抗损韧性增强的关键技术及设计策略。

3.1.1 隧道结构本体抗损韧性

本体抗损韧性聚焦于提升隧道主体的抗损伤、变形能力及损伤后的残余承载力与功能性,需从设计理念、减震装置、新型材料三个层面综合施策。

(1) 设计理念

工程抗震设计在近百年来取得了长足发展,经历了从传统抗震设计到基于性能设计的演进过程,未来将向基于韧性分析的设计方向发展。在结构设计优化方面,鲁棒性理念的应用为抗力韧性提升奠定了基础。华雨杉等[76]、王瑞川等[77]分别将鲁棒性设计理念融入双层衬砌输水盾构隧道与大直径盾构隧道的横断面设计中,实现了结构参数的优化。肖明清等[23]从冗余性、鲁棒性等维度建立盾构隧道韧性设计指标体系,结合承载能力与正常使用极限状态,从“强度”“变形”“裂缝控制”三方面细化指标,并构建“设计+评价”方法,为结构抗御地震提供了设计框架。针对特殊场景,王剑宏等[78]通过分析东京湾横断公路隧道的防水及耐久性措施,为水下大直径隧道提出“多重防水、多方防腐、全生命周期设计”的综合对策,旨在建立以性能和成本为指标的全生命周期设计方法,从长期性能保障角度增强结构抗力。林星涛等[79]梳理了装配式地铁地下车站结构形式与设计方法,提出韧性设计理念,从韧性三个层次开展设计并形成框架,为装配式地下结构的抗力提升提供了路径。对于穿越活动断层隧道,朱合华等[72]在调研典型震害的基础上,搭建了抗震韧性统一设防理念与设计框架,提出“震前预留、震中稳定、震后恢复”的设防目标,建立了“场地分区、结构分段”准则与“抗(减)、让、诱(避)/抢”分阶段设计思想,为穿断层隧道提供了全过程抗力保障策略。

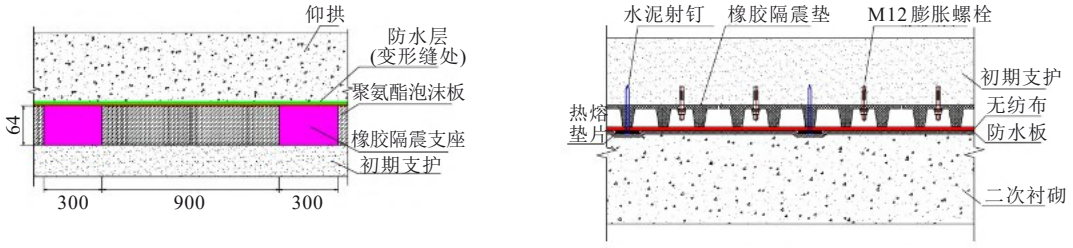
(2) 减震装置

减震装置属于结构控制技术,通过控制结构与结构协同承受地震作用,以减轻结构的地震反应[80]。减震措施的创新是提升抗力韧性的关键[81],相关研究聚焦于结构受力优化与耗能能力增强。

习智强[82]和廖帝增[83]在盾构隧道管环薄弱位置设置形状记忆合金(Shape Memory Alloys, SMA)柔性减震节点,研究表明该节点不仅减震效果良好,还能使结构具备一定的变形自恢复能力。田四明等[84]通过现场调查、模型试验及数值模拟,建立抗震技术体系,提出新型多级减震可变结构设计体系,以增强结构在灾害过程中抵抗变形破坏的能力。周颖等[85]从不同方面阐述了可恢复功能结构的特点及其与传统抗震结构的差别。禹海涛等[81]提出了一种适用于沉管隧道的接头减震耗能装置,该装置通过特定的材料或构件组合,在接头受到外力作用时,通过变形来消耗能量,从而减轻接头的损伤。令永春[86]在研究穿越活动断裂带铁路隧道修复技术的洞身永久工程中,设置了仰拱隔震支座及拱墙隔震垫作为减震消能层,如图3所示。

(3) 新型材料

隧道在灾害中抵抗破坏的技术措施不断创新与发展,新型材料技术展现出更优性能。胡磊[87]通过实验研究显示,钢纤维混凝土衬砌的抗震性能优于普通混凝土衬砌,且在一定范围内钢纤维掺量越大,韧性提升越明显。黄娟等[88]通过FLAC2D分析发现,地基加固能有效降低结构内力和变形,加固范围越大、弹性模量提高倍数越高,减震效果越显著。针对穿越活动断裂带的特殊隧道,费建波等[89]在初期支护与二次衬砌间填充新型橡胶隔震层结构(如微孔发泡橡胶复合结构等),并研制速度相关高阻尼橡胶材料,经循环加载试验验证其具有良好的耗能效果,可有效削弱地震作用。Wang等[90]为研究聚苯乙烯泡沫对圆形隧道的减震,提出了4种布置方式,并运用无限元动力边界技术,对比分析了有减震隔离层和无减震隔离层时圆形隧道在地震作用下的动力响应差异。



(a) 仰拱隔震支座布设示意(单位：mm)　　(b) 拱墙隔震垫布设示意图

图 3　减震装置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of seismic mitigation device

3.1.2　界面抗损韧性

界面抗损韧性增强聚焦于维持和提升隧道结构与围岩/土体之间界面的有效接触状态、应力传递能力和抗剪切滑移能力，防止界面劣化引发连锁破坏。王志杰等[91]对围岩-隧道衬砌结构体系进行了减震研究，在分析地面结构隔震原理的基础上，以隧道洞口段为研究对象，从隔震角度出发提出了地下结构减震模式的基本构思。周德培[92]结合实际工程研究了施工技术和抗震材料对隧道抗震性能的影响，并对南昆线乐善村 2 号隧道和草庵隧道进行室内试验，分析了洞口在强震作用下坍塌的影响因素。王帅帅等[39]采用波函数展开法，推导了平面 SV 波入射下深埋圆形隧道“围岩-减震层-初期支护-二次衬砌”减震系统的动力响应解析解，探讨了减震层厚度、弹性模量对衬砌动应力响应的影响，并通过跨断层隧道大型振动台试验，分析了设置减震层对隧道结构的动力响应特性、衬砌及地表破坏形态的影响。蒋树屏等[93]采用三维有限元方法建立隧道-围岩耦合模型，考虑了 8 种埋深工况，明确了埋深对山岭隧道地震响应的显著影响，所提出的临界埋深和设计参数为工程实践提供了重要参考。

3.2　恢复韧性

恢复韧性聚焦于隧道震后快速恢复功能的能力，其核心在于通过主动设计提升结构的“可恢复性”，以缩短恢复时间、降低恢复成本。具体可通过自复位结构、可更换构件、本体修复三大策略实现。

3.2.1　自复位结构

自复位结构可依靠自身恢复力或少量外部辅助，消除残余变形并自动恢复至初始几何状态，从而大幅降低修复工作量与残余变形处理难度，为结构功能快速恢复奠定基础[94]。

自复位结构主要由三部分组成：可摇摆构件(如剪力墙、柱、采用开合机制的梁柱节点等)、自复位元件(如预应力筋、SMA 等)，以及耗能元件(如防屈曲支撑、角钢、阻尼器等)。该类结构兼具传统结构与摇摆结构的特性，震后可通过其内置的可恢复机制复位至预期工作状态，残余变形小，经简单修复即可恢复使用功能。相较于传统结构，其通过放松特定构件的连接约束，允许构件在地震中产生可控的摇摆或开合以耗散地震能量[95]，并可在关键截面设置可更换阻尼器，将震后损伤集中于这些阻尼器，从而进一步提升结构的震后韧性。

3.2.2　可更换构件

可更换构件的核心思想是通过精细化设计，将结构震后损伤主动引导并集中于预设的、易于操作的构件、元件或材料上，从而保障主体结构基本完好或大幅减轻其损伤程度。这类可更换构件(如耗能连接件、阻尼器、外包板等)作为抗震体系中的第一道防线，具备优异的耗能能力、稳定的性能，并便于拆装更换；在中小震作用下，其可与主体结构协同工作，保障正常使用功能；在强震作用下，则优先产生塑性变形或破坏，通过耗散地震能量来保护主体结构。

震后，这些受损的构件可被快速检测、拆除，并利用备件高效替换，实现结构功能的快速恢复，显著降低功能中断带来的社会、经济影响。该体系可有效提升结构恢复韧性，但也存在结构刚度低于传统结构的问题，且在设计方法、与主体结构之间的可靠协同机制以及构件更换后的整体性能变化等关键问题上，仍需进一步深入研究[96]。

3.2.3　本体修复

针对衬砌混凝土开裂、压碎及钢筋屈服等结构本体不可避免的损伤，需研发并应用快速、高效、耐久的新型修复材料与技术，对受损结构进行原位快速修复补强，以恢复甚至提升其承载力与耐久性，

保障隧道长期安全运营。

在震后修复方案与技术研究方面，相关研究不断深化。戴志仁等[97]明确了震后隧道整体修复方案，涵盖洞身临时加固与衬砌永久补强，为系统性修复提供了思路。张明[98]以兰新高铁大梁隧道至祁连山隧道段震后修复为背景，研究了线路平面与纵断面的线形修复方案及参数设置，并建立中国标准动车组车辆-线路动力学分析模型，从安全与舒适性角度评估了高铁无砟轨道修复方案的合理性。张邵华[99]以兰新高铁大梁隧道震害案例为依托，通过扫描统计设站精度，完成隧道断面提取与变形检测分析，明确了不同区段的变形规律，为修复设计提供了关键数据。令永春[86]依托兰新高铁大梁隧道震害整治工程，通过现场调研、测绘、勘探等手段，揭示了穿越活动断裂带铁路隧道在近场强震下的破坏特征，提出了可操作性强的原位修复技术方案，可为同类工程提供技术参考。温傲寒[100]首次提出了“结构易修性”概念，用以量化评估不同修复路径对结构性能的提升效果，为震后修复路径的选择提供了理论依据。

4 存在的问题及展望

通过系统梳理隧道抗震韧性的评估模型、框架及提升技术，发现现有研究仍存在模型适配性不足、智能化融合不深、全生命周期协同性差、多灾种耦合研究薄弱等问题。未来需围绕以下四方面深化研究，以推动隧道抗震韧性向精准化、系统化、智能化发展。

（1）深化与创新评估方法与模型。应拓展多尺度评估框架，紧密结合地下结构与环境的耦合特性，建立从构件、结构、系统到城市层面的响应关联，并纳入土层-结构相互作用、多次余震扰动等动态因素。通过精细化的参数校准与多灾害场景模拟，提升模型对复杂地震作用下韧性演化规律的刻画能力，并研发更适配隧道工程特性的概率性韧性量化模型。

（2）深度融合智能化技术。未来应聚焦于可落地的人工智能技术，例如：利用迁移学习破解特殊地质与灾害工况下数据匮乏的难题；借助强化学习优化震后应急修复的资源调度策略；应用计算机视觉提升隧道病害识别的精度与效率。推动智能化技术从单体隧道评估向区域隧道网络的协同韧性管理拓展，最终实现“监测—评估—修复—管控”的全流程智能化升级。

（3）构建全生命周期协同韧性提升体系。应将韧性理念与提升措施贯穿于隧道规划、勘察设计、施工建造、运营维护的全生命周期。在规划阶段预留冗余空间与弹性接口；在设计阶段深化新型抗震材料、可更换构件及可恢复结构的应用；在施工阶段强化与地质条件相适配的抗震构造工艺；在运维阶段建立集成监测数据的动态性能数据库，从而形成全生命周期韧性提升的闭环，以系统思维应对隧道环境耦合与功能复杂的挑战。

（4）加强多灾种耦合作用下的韧性研究。需深入探究多重灾害的链式触发机制、复杂环境下隧道结构的损伤机理，以及多灾种耦合的灾变规律与控制方法。重点分析隧道局部失效可能引发的城市地下交通系统级联崩溃效应，进而构建多灾种耦合情景下的隧道韧性评估与综合提升体系，以弥补当前以单一灾害研究为主的不足。

5 结论

隧道抗震韧性研究是提升地下工程灾害防御能力、保障城市安全运维的核心议题之一。本文系统梳理了隧道抗震韧性的概念内涵、评估方法及提升策略，主要形成以下结论。

（1）隧道抗震韧性概念源于生态学，并经工程领域深化后进一步发展，其核心是系统在地震作用全过程中抵御破坏、维持功能与快速恢复的能力，体现了从“被动抗震”到“主动抗韧”的理念转变，可划分为抗力韧性与恢复韧性两大核心研究维度。

（2）隧道抗震韧性评估方法呈现出多模型、多维度、多情景融合的发展趋势。本文归纳了确定性及考虑不确定性的两大类（共14种）韧性量化模型，总结了模糊逻辑模型与仿真模型相结合的情景化评估框架，将功能评估划分为组件、系统与功能关联性三个层次，从而构建了涵盖量化模型、情景框架、工程应用、数字化赋能、场景适配及精度提升的完整评估技术体系。

（3）提升隧道抗震韧性需从“抗力”与“恢复”两个维度协同推进。抗力韧性提升侧重于本体抗损（韧性设计、减震装置、新型材料）和界面抗损（隧道-围岩耦合、减震层技术）；恢复韧性提升可通过自复位结构、可更换构件及高效本体修复技术来实现，最终全面提高系统的可恢复性与经济性。

（4）当前隧道抗震韧性研究仍面临诸多挑战，

主要体现在多数评估模型未充分考虑多灾种耦合效应，真实地震数据匮乏制约了模型验证与校准，且缺乏对韧性提升措施的全生命周期成本效益分析。未来应将智能感知、数据驱动与数字孪生平台作为核心方向，推进三者的深度融合与协同技术研发，以推动该领域向更精准、更系统、更智慧的方向发展。

（5）隧道抗震韧性评估与提升需坚持场景导向、分类施策原则，针对山岭隧道、跨断层隧道、城市浅埋隧道三类典型场景，构建差异化的评估指标与技术体系。未来需进一步细化各类典型场景的韧性指标库、评估标准与技术指南，推动场景化韧性设计规范与模块化快速恢复预案的落地，提升研究成果的工程可操作性。

参考文献（References）

[1] HE X, WU J D, WANG C L, et al. Historical earthquakes and their socioeconomic consequences in China: 1950—2017 [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(12): 27-28.

[2] 崔光耀，王明年，林国进，等. 汶川地震公路隧道洞口段震害机理及抗震对策研究[J]. 现代隧道技术，2011，48(6)：6-10，22.
CUI Guangyao, WANG Mingnian, LIN Guojin, et al. Study of the earthquake damage mechanism and aseismatic countermeasure of a highway tunnel portal section in the Wenchuan seismic disaster area [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(6): 6-10, 22.

[3] TAKAHASHI S, KURIYAMA Y, TOMITA T. Urgent survey for 2011 great east Japan earthquake and tsunami disaster in ports and coasts—part Ⅰ (tsunami) [R]. Tokyo: Port and Airport Research Institute, 2011: 1231.

[4] HUANG S, XIN C L, SONG D Q, et al. Resilience assessment of the seismic damage mechanism of the Daliang high-speed railway tunnel in the 2022 Menyuan earthquake (M_W6.7) in China[J]. Transportation Geotechnics, 2024, 49: 101417.

[5] 耿萍，曾冠雄，郭翔宇，等. 近场脉冲地震作用下穿越断层带隧道地震响应[J]. 中国公路学报，2020，33(5)：122-131.
GENG Ping, ZENG Guanxiong, GUO Xiangyu, et al. Seismic response of tunnel structures passing through fault zone under near-field pulsed earthquakes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 122-131.

[6] 康现栋，付皓然，赵光，等. 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)：37-42.
KANG Xiandong, FU Haoran, ZHAO Guang, et al. Research and application of evaluation methods for earthquake resilience of individual building structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(8): 37-42.

[7] CUI H Z, TAO R, BAO X H, et al. Seismic resilience evolution of shield tunnel with structure degradation[J]. Applied Sciences, 2023, 14(1): 72.

[8] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.

[9] TIMMERMAN P. Vulnerability, resilience and the collapse of society[J]. Environmental Monograph, 1981, 1: 1-42.

[10] 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.

[11] MORIARTY D. Designing and managing complex systems [M]. London: Elsevier Academic Press, 2023.

[12] COMFORT L K. Shared risk: complex systems in seismic response [M]. Oxford: Emerald Group Publishing Limited, 1999.

[13] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 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.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for seismic resilience assessment of buildings: GB/T 38591—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市工程系统抗震韧性评价导则：RISN-TG041—2022[Z]. 北京：中华人民共和国住房和城乡建设部，2022.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People′s Republic of China. Guideline for evaluation of seismic resilience assessment of urban engineering systems: RISN-TG041—2022[Z]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People′s Republic of China, 2022.

[15] 雷继勇. 工程场地抗震韧性评价指标及评价方法研究[D]. 哈尔滨：中国地震局工程力学研究所，2023.
LEI Jiyong. Study on evaluation index and evaluation method of seismic toughness of engineering site[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2023.

[16] 路德春，马超，杜修力，等. 城市地下结构抗震韧性研究进展[J]. 中国科学(技术科学)，2022，52(10)：1469-1483.
LU Dechun, MA Chao, DU Xiuli, et al. Earthquake resilience of urban underground structures: state of the art[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(10): 1469-1483.

[17] 张成明，钟紫蓝，甄立斌，等. 适用于圆形隧道损伤评价的地震动强度指标研究[J]. 工程力学，2021，38(1)：100-108.
ZHANG Chengming, ZHONG Zilan, ZHEN Libin, et al. Seismic intensity measures for the damage evaluation of circular tunnels [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(1): 100-108.

[18] WALKER B, HOLLING C S, CARPENTER S R, et al. A handful of heuristics and some propositions for understanding resilience in social-ecological systems[J]. Ecology and Soci-

ety, 2006,11(1): 13-37.

[19] GONZÁLEZ C, NIÑO M, JAIMES M A. Event-based assessment of seismic resilience in Mexican school buildings[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18(14): 6313-6336.

[20] 吴春玉. 地下框架结构抗震性能评价及韧性提升技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2023.
WU Chunyu. Research on seismic performance evaluation and resilience upgrading technology of underground frame structure [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023.

[21] 郑刚, 程雪松, 周海祚, 等. 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): 1-38.
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): 1-38.

[22] KHETWAL S, PEI S L, GUTIERREZ M. A data-driven approach for direct assessment and analysis of traffic tunnel resilience[C]//Information Technology in Geo-Engineering. Cham: Springer, 2020: 168-177.

[23] 肖明清, 封坤. 盾构隧道结构韧性设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(8): 204-213.
XIAO Mingqing, FENG Kun. Study on the resilient structure design of shield tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(8): 204-213.

[24] 宗成才, 冀昆, 温瑞智, 等. 城市燃气管网三维度抗震韧性定量评估方法[J]. 工程力学, 2021, 38(2): 146-156.
ZONG Chengcai, JI Kun, WEN Ruizhi, et al. Three-dimensional seismic resilience quantification framework for the urban gas network[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(2): 146-156.

[25] 毕熙荣, 冀昆, 宗成才, 等. 工程抗震韧性定量评估方法研究进展综述[J]. 地震研究, 2020, 43(3): 417-430.
BI Xirong, JI Kun, ZONG Chengcai, et al. Review on advances in quantitative evaluation methods for engineering seismic resilience [J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3): 417-430.

[26] 李一明. 结构全寿命周期抗震韧性评估方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
LI Yiming. Methodology for assessing life-cycle seismic resilience of structures[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.

[27] 赵旭东, 陈志龙, 龚华栋, 等. 关键基础设施体系灾害毁伤恢复力研究综述[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 62-71.
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, 50 (12): 62-71.

[28] ZOBEL C W, KHANSA L. Characterizing multi-event disaster resilience[J]. Computers & Operations Research, 2014, 42: 83-94.

[29] WHITSON J C, RAMIREZ-MARQUEZ J E. Resiliency as a component importance measure in network reliability [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(10): 1685-1693.

[30] ORWIN K H, WARDLE D A. New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(11): 1907-1912.

[31] ROSE A, LIAO S Y. Modeling regional economic resilience to disasters: a computable general equilibrium analysis of water service disruptions [J]. Journal of Regional Science, 2005, 45(1): 75-112.

[32] ROSE A. Economic resilience to natural and man-made disasters: multidisciplinary origins and contextual dimensions[J]. Environmental Hazards, 2007, 7(4): 383-398.

[33] FRANCIS R, BEKERA B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 121: 90-103.

[34] CHANG S E, SHINOZUKA M. Measuring improvements in the disaster resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2004, 20(3): 739-755.

[35] YOUN B D, HU C, WANG P F. Resilience-driven system design of complex engineered systems[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(10): 101011.

[36] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, XING M. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012, 36: 23-31.

[37] AYYUB B M. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making [J]. Risk Analysis, 2014, 34(2): 340-355.

[38] HASHIMOTO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation[J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 14-20.

[39] 王帅帅, 高波, 隋传毅, 等. 减震层减震原理及跨断层隧道减震技术振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1086-1092.
WANG Shuaishuai, GAO Bo, SUI Chuanyi, et al. Mechanism of shock absorption layer and shaking table tests on shaking absorption technology of tunnel across fault[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1086-1092.

[40] ABIMBOLA M, KHAN F. Resilience modeling of engineering systems using dynamic object-oriented Bayesian network approach [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 130: 108-118.

[41] WEARS R L, ROBERTS K H. Special issue, safety science, high reliability organizations and resilience engineering [J]. Safety Science, 2019, 117: 458-459.

[42] MULLER G. Fuzzy architecture assessment for critical infrastructure resilience [J]. Procedia Computer Science, 2012, 12: 367-372.

[43] AZADEH A, SALEHI V, ARVAN M, et al. Assessment of resilience engineering factors in high-risk environments by

fuzzy cognitive maps: a petrochemical plant[J]. Safety Science, 2014, 68: 99-107.

[44] SAATY T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(3): 234-281.

[45] LI D. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20.

[46] ALBORES P, SHAW D. Government preparedness: using simulation to prepare for a terrorist attack[J]. Computers & Operations Research, 2008, 35(6): 1924-1943.

[47] JAIN S K, BHUNYA P K. Reliability, resilience and vulnerability of a multipurpose storage reservoir/confiance, résilience et vulnérabilité d'un barrage multi-objectifs[J]. Hydrological Sciences Journal, 2008, 53(2): 434-447.

[48] STERBENZ J P G, HUTCHISON D, ÇETINKAYA E K, et al. Resilience and survivability in communication networks: strategies, principles, and survey of disciplines[J]. Computer Networks, 2010, 54(8): 1245-1265.

[49] ADJETEY-BAHUN K, BIRREGAH B, CHÂTELET E, et al. A model to quantify the resilience of mass railway transportation systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 153: 1-14.

[50] SHEN J, BAO X H, CHEN X S, et al. Seismic resilience assessment method for tunnels based on cloud model considering multiple damage evaluation indices[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 157: 106360.

[51] HUANG Z K, ZHANG D M, PITILAKIS K, et al. Resilience assessment of tunnels: framework and application for tunnels in alluvial deposits exposed to seismic hazard[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 162: 107456.

[52] 李心熙，禹海涛. 沉管隧道纵向抗震韧性评价方法研究[J]. 震灾防御技术，2023，18(1)：37-43.
LI Xinxi, YU Haitao. Seismic resilience assessment for longitudinal response of immersed tunnels[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2023, 18(1): 37-43.

[53] 倪鑫. 黄土地区盾构隧道结构韧性影响因素及评价方法研究[D]. 西安：西安理工大学，2021.
NI Xin. Study on the influencing factors and resilience evaluation method of shield tunnel structure resilience in loess area[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.

[54] 甘彬霖，张冬梅，高俊华，等. 考虑灾链演化全过程的盾构隧道结构韧性评估[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2025，53(7)：1016-1025.
GAN Binlin, ZHANG Dongmei, GAO Junhua, et al. A resilience evaluation method of shield tunnel structures considering the entire disaster process[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2025, 53(7): 1016-1025.

[55] MENG S B, LI W X, LIU Z X, et al. Rapid resilience assessment framework for mountain tunnels subjected to near-fault seismic ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 182: 108746.

[56] 张恒，徐龙军，彭龙强，等. 跨断层铁路隧道精细化建模与力学分析[J]. 地震工程与工程振动，2024，44(5)：1-12.
ZHANG Heng, XU Longjun, PENG Longqiang, et al. Fine modeling and mechanical analysis of cross-fault railway tunnels[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(5): 1-12.

[57] HUANG H W, ZHANG D M, HUANG Z K. Resilience of city underground infrastructure under multi-hazards impact: from structural level to network level[J]. Resilient Cities and Structures, 2022, 1(2): 76-86.

[58] CUI C Y, XU M Z, XU C S, et al. An ontology-based probabilistic framework for comprehensive seismic risk evaluation of subway stations by combining Monte Carlo simulation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 135: 105055.

[59] SAADAT Y, AYYUB B M, ZHANG Y J, et al. Resilience-based strategies for topology enhancement and recovery of metrorail transit networks[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A(Civil Engineering), 2020, 6(2): 04020017.

[60] ZHANG D M, DU F, HUANG H W, et al. Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example[J]. Safety Science, 2018, 106: 230-243.

[61] 白雪. 复杂艰险地区铁路隧道施工安全韧性评估及提升策略研究[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2023.
BAI Xue. Study on safety resilience evaluation and improvement strategy of railway tunnel construction in complex and dangerous areas[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.

[62] 包艺翔. 公路隧道施工安全韧性评价及提升策略研究[D]. 北京：北京建筑大学，2022.
BAO Yixiang. Study on safety and toughness evaluation and promotion strategy of highway tunnel construction[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.

[63] 魏强，刘加奇，王景春，等. 基于理想模糊物元的隧道施工安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报，2021，31(8)：62-68.
WEI Qiang, LIU Jiaqi, WANG Jingchun, et al. Evaluation of safety resilience in tunnel construction based on ideal fuzzy matter element[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(8): 62-68.

[64] SU Z, YU J, XIAO X, et al. Deep learning seismic damage assessment with embedded signal denoising considering three-dimensional time-frequency feature correlation[J]. Engineering Structures, 2023, 286: 116148.

[65] WANG L J, GENG P, CHEN J B, et al. Machine learning-based fragility analysis of tunnel structure under different impulsive seismic actions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 133: 104953.

[66] MALIK F N, RICLES J, YARI M, et al. Physics informed recurrent neural networks for seismic response evaluation of nonlinear systems[J]. arXiv preprint arXiv:2308.08655, 2023.

[67] MOKHTARI F, IMANPOUR A. A digital twin-based

framework for multi-element seismic hybrid simulation of structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 186: 109909.

[68] QIU T, CHEN X S, RAO W, et al. Intelligent monitoring-based resilience assessment system for prefabricated underground structures based on restorability[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 158: 106411.

[69] DUI H Y, GUO W N, XIA W Y, et al. Digital twin-based resilience analysis and emergency maintenance with generative AI of smart urban metro systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2026, 265: 111537.

[70] 何则干, 王小威, 左正波. 山岭隧道洞口段衬砌结构地震响应数值分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 7018-7024.
HE Zegan, WANG Xiaowei, ZUO Zhengbo. Numerical analysis of seismic response of lining structure for portal section in mountain tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 7018-7024.

[71] SUN H, WU H G, MA Z G, et al. Analysis of seismic damage modes of landslides containing tunnels under horizontal earthquake action[J]. Geofluids, 2022, 2022: 6026316.

[72] 朱合华, 禹海涛, 韩富强, 等. 穿越活动断层隧道抗震韧性设计理念与关键问题[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 193-204.
ZHU Hehua, YU Haitao, HAN Fuqiang, et al. Seismic resilience design principles and key issues for tunnels crossing active faults[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(11): 193-204.

[73] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's traffic tunnel engineering research: 2022[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 1-40.

[74] LU D C, MA C, DU X L, et al. Earthquake resilience of urban underground structures: State ofthe art[J]. Scientia Sinica Technologica, 2022, 52(10): 1469-1483.

[75] DONG Z F, LI C J, WEN S, et al. Study on seismic resilience quantitative framework of subway stations and resilience improvement strategy[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 869965.

[76] 华雨杉, 黄宏伟, 陈坤, 等. 双层衬砌输水盾构隧道鲁棒性设计方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(9): 145-155.
HUA Yushan, HUANG Hongwei, CHEN Kun, et al. Robust design method of water conveyance shield tunnel with double lining[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(9): 145-155.

[77] 王瑞川. 复合地层大直径盾构隧道鲁棒性设计方法[D]. 上海: 同济大学, 2019.
WANG Ruichuan. Robust design method of large diameter shield tunnel in composite stratum[D]. Shanghai: Tongji University, 2019.

[78] 王剑宏, 常洪雷, 刘健, 等. 水下盾构隧道耐久性与全生命周期设计[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(2): 1-13.
WANG Jianhong, CHANG Honglei, LIU Jian, et al. The durability of underwater shield tunnel and its life-cycle design[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(2): 1-13.

[79] 林星涛, 朱心诚, 陈湘生, 等. 装配式地铁地下车站结构韧性设计方法[J]. 中国公路学报, 2025, 38(5): 146-157.
LIN Xingtao, ZHU Xincheng, CHEN Xiangsheng, et al. Resilience design method for prefabricated underground metro station structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(5): 146-157.

[80] 孙铁成, 高波, 叶朝良. 地下结构抗震减震措施与研究方法探讨[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(3): 1-5, 10.
SUN Tiecheng, GAO Bo, YE Zhaoliang. Discussion on anti-seismic and seismic-relieving measures and corresponding research methods for underground structures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(3): 1-5, 10.

[81] 禹海涛, 萧文浩, 袁勇, 等. 沉管隧道接头减震耗能装置设计与试验验证[J]. 中国公路学报, 2016, 29(12): 142-148.
YU Haitao, XIAO Wenhao, YUAN Yong, et al. Design and experimental verification of seismic mitigation and energy-dissipated equipment for immersion tunnel joint[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(12): 142-148.

[82] 习智强. 水下盾构隧道纵向抗震性能分析及SMA柔性减震节点研究[D]. 广州: 广州大学, 2017.
XI Zhiqiang. Research on longitudinal seismic performance analysis and SMA flexible seismic isolation joints of underwater shield tunnels[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.

[83] 廖帝增. 基于SMA的水下盾构隧道减震节点试验与有限元分析研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
LIAO Dizeng. Experiments and finite element analysis of underwater shield tunnel damping joints based on SMA[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.

[84] 田四明, 吴克非, 于丽, 等. 穿越活动断裂带铁路隧道抗震关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(8): 1351-1364.
TIAN Siming, WU Kefei, YU Li, et al. Key technol ogy of anti-seismic for railway tunnels crossing active fault zone[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1351-1364.

[85] 周颖, 吴浩, 顾安琪. 地震工程: 从抗震、减隔震到可恢复性[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 1-12.
ZHOU Ying, WU Hao, GU Anqi. Earthquake engineering: from earthquake resistance, energy dissipation, and isolation, to resilience[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 1-12.

[86] 令永春. 穿越活动断裂带铁路隧道震害特征及修复技术[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(3): 1027-1037.
LING Yongchun. Seismic damage characteristics and repair technology of railway tunnels crossing active fault zone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(3): 1027-1037.

[87] 胡磊. 钢纤维混凝土隧道衬砌结构的地震动力响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

HU Lei. Study on seismic dynamic response of steel fiber reinforced concrete tunnel lining structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[88] 黄娟，彭立敏，李兴龙. 可液化地层狮子洋盾构隧道横向地震响应规律及减震措施研究[J]. 岩土工程学报，2009，31(10)：1539-1546.
HUANG Juan, PENG Limin, LI Xinglong. Transverse seismic responses of Shiziyang shield tunnel in liquefiable soil and its shock absorption measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1539-1546.

[89] 费建波，魏嘉延，金家康，等. 地震多发区山岭隧道新型隔震结构设计与应用研究[J]. 隧道建设(中英文)，2023，43(11)：1935-1943.
FEI Jianbo, WEI Jiayan, JIN Jiakang, et al. Design and application of seismic isolation structure for mountain tunnels in earthquake-prone areas[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(11): 1935-1943.

[90] WANG D L, BATHURST R J. Research on shock mitigation on circular tunnels using expanded polystyrene[C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE). Lushan, China: IEEE, 2011: 2528-2531.

[91] 王志杰，高波，关宝树. 围岩-隧道衬砌结构体系的减震研究[J]. 西南交通大学学报，1996(6)：16-20.
WANG Zhijie, GAO Bo, GUAN Baoshu. Research of isolation of rock liner structure systems[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996(6): 16-20.

[92] 周德培. 强震区隧道洞口段的动力特性研究[J]. 地震工程与工程振动，1998，18(1)：124-130.
ZHOU Depei. Dynamic behavior of portal part of tunnel subjected to strong ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(1): 124-130.

[93] 蒋树屏，方林，林志. 不同埋置深度的山岭隧道地震响应分析[J]. 岩土力学，2014，35(1)：211-216，225.
JIANG Shuping, FANG Lin, LIN Zhi. Seismic response analysis of mountain tunnels in different depths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 211-216, 225.

[94] 吕西林，周颖，陈聪. 可恢复功能抗震结构新体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动，2014，34(4)：130-139.
LÜ Xilin, ZHOU Ying, CHEN Cong. Research progress on innovative earthquake-resilient structural systems[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4): 130-139.

[95] 张国伟，赵紫薇，孙祚帅. 自复位结构抗震性能研究综述[J]. 建筑结构，2018，48(增刊2)：463-470.
ZHANG Guowei, ZHAO Ziwei, SUN Zuoshuai. Review on the seismic behavior of self-centering structure[J]. Building Structure, 2018, 48(Suppl02): 463-470.

[96] 翁源，李爱春，赵婷，等. 隧道工程系统韧性影响因素及评价研究[J]. 现代隧道技术，2023，60(5)：40-47.
WENG Yuan, LI Aichun, ZHAO Ting, et al. Research on factors influencing the resilience of the tunnel system and related evaluation[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(5): 40-47.

[97] 戴志仁，王泽宇，王俊，等. 活动断裂区域隧道工程震后修复关键技术研究[J]. 铁道工程学报，2023，40(8)：72-79.
DAI Zhiren, WANG Zeyu, WANG Jun, et al. Key techniques and countermeasures for tunnel repair projects after earthquake while tunneling through active faults[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(8): 72-79.

[98] 张明. 高速铁路震后线形修复方法及参数评估[J]. 铁道工程学报，2023，40(4)：38-43，49.
ZHANG Ming. Method and parameter evaluation on post-earthquake linear restoration of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(4): 38-43, 49.

[99] 张邵华. 三维扫描技术支持下的震后隧道断面变形分析[J]. 测绘通报，2024(9)：145-150.
ZHANG Shaohua. Deformation analysis of tunnel section after earthquake based on 3D scanning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(9): 145-150.

[100] 温傲寒. 考虑不同修复路径的RC框架结构工程韧性评估[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2018.
WEN Aohan. Structural resilience evaluation of reinforced concrete frame structures considering different repairing path[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

（本文编辑：张向红）