

雷继勇,公茂盛,赵一男. 2024. 工程场地抗震韧性评价指标体系[J]. 地震研究, 47(1): 074–080, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0007.

Lei J Y, Gong M S, Zhao Y N. 2024. The indicator system used in seismic resilience assessment of engineering sites[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(1): 074–080, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0007.

工程场地抗震韧性评价指标体系*

雷继勇^{1,2}, 公茂盛^{1,2✉}, 赵一男^{1,2}

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

2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 阐述了工程场地抗震韧性的概念; 围绕稳定性和恢复力两个韧性特征, 分析了场地条件及特征参数、地震危险性、地震地质灾害、工程对场地的功能要求、地震危险性分析能力、资源保障能力、应急管理能力等因素对工程场地抗震韧性的影响; 在此基础上构建了工程场地抗震韧性评价指标体系。利用该评价指标体系, 并借助合理的评价方法, 可实现工程场地抗震韧性的定量评价。

关键词: 工程场地; 抗震韧性; 稳定性; 恢复力; 指标体系

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)01-0074-07
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0007

0 引言

作为一种突发性自然灾害, 地震造成的人员伤亡和经济损失是十分惨重的。随着社会经济的快速发展, 仅仅保证城市震后安全已无法满足防震减灾工作的需求。抗震韧性概念的提出为解决现代城市和重大基础设施遭受严重地震破坏之后产生的重要功能中断, 重建难度大、时间长, 社会代价巨大等问题提供了新的思路, 成为防震减灾领域的研究热点和前沿学科(翟长海等, 2018)。

近年来, 国内外大量学者对城市和重大基础设施的抗震韧性评价进行了研究, 如翟长海等(2018)对国内外关于城市抗震韧性评估的研究进行了较全面的综述, 并提出了城市抗震韧性的关键科学问题及韧性提升策略; 李倩等(2019)通过文献调研将供水系统抗震韧性概括为地震安全性和震后恢复能力两方面的内容, 分析了供水系统抗震韧性评价指标, 提出了供水系统地震韧性

评价模型; 俎林和黄勇(2020)以公路桥梁的跨中挠度与跨径的比值作为损伤指标进行主梁的易损性分析, 在此基础上结合损失函数和恢复模型计算得到韧性评价指标, 提出了一种针对维修加固桥梁的抗震韧性评价方法; 周颖等(2023)以屈曲约束支撑-钢框架为例定量分析了国内外相关标准对建筑抗震韧性评级上的差异与共通之处; 贾俊峰等(2022)系统总结了单体桥梁和桥梁网络的抗震韧性评估方法, 分析了桥梁抗震韧性结构的研究方向和未来发展趋势; 尚庆学等(2019)将医疗系统划分为不同的医疗功能单元和子系统, 建立了医疗系统抗震韧性评估指标体系, 并运用层次分析法确定了指标体系中各指标的权重系数; 宗成才等(2021)充分考虑地震动输入、管网连通性能评估及修复过程3方面的不确定性, 提出了技术、组织及社会3个维度下的燃气管网抗震韧性定量评估流程; Jacques等(2014)用系统功能随时间变化曲线所围面积来表示医疗系统灾害韧性, 采用不同关键医疗服务水平加权求和来量化医疗

* 收稿日期: 2023-03-21.

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目(2021EEVL0301); 国家重点研发计划课题(2017YFC1500601); 国家自然科学基金项目(52178514, 51678541).

第一作者简介: 雷继勇(1997-), 硕士研究生在读, 主要从事地震工程研究. E-mail: ljj19970807@163.com.

✉通信作者简介: 公茂盛(1976-), 研究员, 博士, 主要从事地震工程研究. E-mail: gmshiem@163.com.

系统功能；Cimellaro 等（2016）从时间和空间两个尺度构建韧性评价指标，提出将 PEOPLES 框架用于社区抗震韧性定量评估。

城市及城市中的各类重大基础设施都修建在一定的工程场地之上，其安全性和稳定性与工程场地的抗震性能密切相关。工程场地在遭受地震作用后可能发生砂土液化、软土震陷、地表破裂、地面沉降、滑坡和崩塌等地质灾害，影响城市和重大基础设施的安全性及灾后重建。薄景山等（2022）指出，理论上城市和重大基础设施的抗震韧性评价应当考虑场地韧性的问题，工程场地抗震韧性评价是城市和重大基础设施抗震韧性评价的重要组成部分。目前，地震工程领域关于工程场地抗震韧性的相关研究较为薄弱，在已有的城市和重大基础设施抗震韧性评价中鲜有工程场地抗震韧性评价的内容，如周燕国等（2022）通过对新西兰基督城 REHS 强震台站记录信号进行水平与竖向谱比分析，发现场地刚度会在震后经过数天的快速恢复后进入相对稳定的、缓慢的上升期，并重点揭示了震后场地小应变剪切刚度的演化规律；薄景山等（2022）基于适应性循环理论提出了场地韧性的概念，讨论了场地稳定性和抗干扰问题，提出了建立场地韧性等级评价指标体系的初步设想，并指出城市及重大工程韧性评价需要考虑场地韧性。

基于上述研究背景，本文参考城市抗震韧性、建筑抗震韧性及场地韧性的定义，尝试将抗震韧性的概念引入工程场地，给出工程场地抗震韧性的定义。围绕工程场地稳定性和恢复力两个韧性特征深入分析工程场地抗震韧性的影响因素，并构建工程场地抗震韧性评价指标体系。

1 工程场地抗震韧性的定义

“韧性”这一术语起源于拉丁词“resillo”，涵义为“恢复到原始状态”（Alexander，2013）。在工程抗震领域，常用韧性来评估城市和建筑物在遭受地震作用后维持与恢复原有功能的能力。Bruneau 等（2003）提出了韧性社区（resilient community）的概念，将社区的抗震韧性定义为“社区吸收地震破坏并快速恢复的能力”，并用 4R 来表示社区抗震韧性的 4 个属性，即鲁棒性、快速性、冗

余性和策略性。我国《建筑抗震韧性评价标准》（GB/T 38591—2020）中将建筑抗震韧性定义为建筑物在设定水准地震作用下，维持与恢复原有建筑功能的能力，并详细说明了建筑抗震韧性评价流程、评价指标以及指标的计算方法。2022 年，我国住房和城乡建设部颁布了《城市工程系统抗震韧性评价导则》（RISN - TG041—2022），该导则将城市抗震韧性定义为城市系统在受到地震影响时维持或恢复其功能的能力，从地震作用后城市工程系统可能的功能损失情况以及功能恢复所需时间两个维度构建了双参数韧性评价方法，并给出了具体的评价步骤和流程。

《建筑抗震设计规范（2016 年版）》（GB 50011—2010）将场地定义为工程群体所在地，它具有相似的反应谱特征，其范围相当于厂区、居民小区和自然村或大于 1.0 km^2 的平面面积。工程场地是广义概念的场地，指新建、改建或扩建的单体或单项工程建设场地以及已有工程所在的场地，这里的工程除了包括人工建设工程，也应包括被人类利用和改造的自然体，如山坡、溶洞、河道等（李小军，2006）。薄景山等（2022）将场地韧性定义为场地在一定强度的地质作用和人类工程活动作用后，维持和恢复场地原有功能和场地环境的能力。

工程场地可以看成是一个复杂的地质体和岩土系统，其抗震韧性是一个比较新的概念。工程场地抗震韧性可以定义为工程场地在遭受地震作用后，维持和恢复原有工程场地功能的能力。其实质是工程场地在受到地震影响时保持稳定而不失效，各类工程的功能不受较大影响，且在震后采取合理工程措施处理后能快速恢复其原有场地功能的能力。工程场地的原有功能是指工程在规划设计时所要求的能够保障工程安全稳定的场地性能。工程场地抗震韧性的内涵具有两面性：一方面是工程场地的客观属性，其自身具有抵抗、吸收地震干扰的能力，在受到地震作用时可以在一定程度上保证城市和各类工程系统的稳定性和安全性；另一方面，工程场地达到什么样的抗震韧性以及震后如何采取措施恢复这一韧性是由人类主观因素所主导的。因此，评价工程场地抗震韧性时，既要考虑工程场地在地震灾害中的客观表现，又要发挥人的主观能动性。

2 工程场地抗震韧性的影响因素分析

由工程场地抗震韧性的定义可知,工程场地抗震韧性既表现为工程场地本身抵抗和吸收地震干扰保持稳定的能力,又表现为在地震灾害发生后人们采取的有效措施,通过有限资源将工程场地快速恢复的能力,工程场地抗震韧性应该是这两种能力的综合。也就是说,工程场地抗震韧性评价应包括维持和恢复两个方面,即稳定性和恢复力。薄景山等(2022)也指出场地的韧性主要表现在稳定性和迅速恢复至稳定状态的能力。因此,本文关于工程场地抗震韧性影响因素的研究主要围绕稳定性和恢复力两方面展开,并构建工程场地抗震韧性影响因素分析框架,如图1所示。

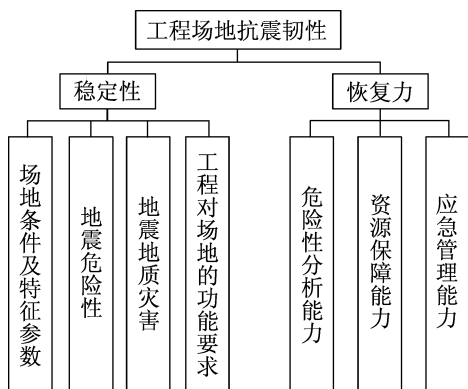


图1 工程场地抗震韧性影响因素分析框架

Fig. 1 Framework of the analysis of the influencing factors of seismic resilience of the engineering sites

2.1 稳定性

工程场地的稳定性是指工程场地在受到地震影响时其本身抵抗和吸收地震灾害的能力。在地震作用下,稳定性差的工程场地容易出现各种破坏,如地面破裂、滑坡、崩塌、地基失效、软土震陷等,这些破坏会造成城市或重大基础设施的重要功能中断。不同类别的工程场地抗震稳定性不同,工程场地的稳定性主要与场地条件及特征参数、地震危险性、地震地质灾害、工程对场地的功能要求等因素有关。

(1) 场地条件及特征参数。在工程地震学研究中,场地条件指场址区内近地表的工程地质条件,主要包括地形地貌、岩土类型、水文地质条

件等。场地条件对工程场地稳定性的影响极为显著。多次震害研究表明(同济大学土木工程防灾国家重点实验室,2008;皇甫岗,2015;薄景山等,2021),高耸孤立的山丘、强风化岩石的陡坡、条件突出的山嘴、河岸和边坡的边缘地带、黄土地貌及喀斯特地貌等不利的地形地貌所在地段震害相对严重,场地稳定性较差;地形平坦、地貌简单的地段场地稳定性较好。场地的岩土类型对场地的地震动和震害有明显影响。通常,土层场地比基岩场地对地震动的放大效应更明显,软弱地基上的建筑物比坚硬地基上的建筑物震害重,基岩场地比土层场地稳定性好。水文地质条件对场地稳定性有重要影响,地下水的存在增大了砂土液化、软土震陷、滑坡等地质灾害隐患,一般情况下地下水埋藏越浅,震害越严重,场地稳定性越差。场地特征参数通常指用以反映基岩上覆盖的近代沉积物或土层的空间分布和动力性能的参数,包括场地覆盖土层厚度和土层等效剪切波速等。《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010)依据覆盖层厚度和等效剪切波速对建设场地进行分类,用以反映不同场地条件对基岩地震动的综合放大效应。通常,场地地质条件优良、覆盖层厚度小、土层等效剪切波速较大的工程场地稳定性好,抗震韧性高。

(2) 地震危险性。地震危险性指城市或工程、建筑物所在场地,在未来一段时间内可能发生破坏性地震的危险程度。工程场地的稳定性与其遭受的干扰程度有关,活动断层、地震动峰值加速度及地震动加速度反应谱特征周期在一定程度上反映了场地内可能遭受地震作用的概率与强弱。通常活断层发育或靠近断层的工程场地发生地震的可能性较大,震害比较严重,稳定性较差。《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)将全国根据Ⅱ类场地上相当于50年超越概率10%的基本地震动峰值加速度数值和地震动加速度反应谱特征周期数值的不同划分为不同抗震设防区域,反映了不同地区可能遭受地震作用的强弱程度。地震作用强烈的场地抗震韧性低,地震作用弱的场地抗震韧性高(张毅毅,2022)。在其它条件相同时,地震动峰值加速度及地震动加速度反应谱特征周期分区值小的工程场地遭受地震灾害的危险程度低,稳定性较好,抗震韧性高。

(3) 地震地质灾害。地震地质灾害指在地震作用下地质体变形或破坏所引起的灾害，影响工程场地稳定性的地震地质灾害隐患主要有地基土液化、软土震陷、滑坡与崩塌等。地基土液化会造成地基失效、喷水冒砂、地面沉降及地面塌陷等破坏形式，使工程场地失去原有功能，降低了场地的稳定性。软土震陷是软土地基的主要震害，指地震引起的建筑或土层的附加沉陷，软土深度浅、厚度大的工程场地震害较为严重，稳定性较差。滑坡与崩塌危险性取决于它们的发育程度，《场地地质灾害危险性评估技术要求（试行）》（T/CAGHP 025—2018）对这两种地质灾害现状评估做了详细说明。通常，地震地质灾害隐患越大，工程场地稳定性越差、抗震韧性越低。

(4) 工程对场地的功能要求。不同类别的工程重要程度不同，对工程场地功能要求也有所不同。重大工程如交通工程、通讯工程、能源工程、生命线工程、工业工程及其它重要工程，如省重点建设的大型影剧院、大型体育馆、大型展览馆、会展中心及高度100米以上的高层建筑等，因其特殊性及其重要性，要保证地震来临时其重要功能不中断，对场地抵抗地震干扰的能力要求较高。通常，满足这一要求的工程场地稳定性较好、抗震韧性较高。

2.2 恢复力

恢复力是指地震灾害发生后，工程场地迅速从不平衡状态恢复为稳定状态的能力，具体表现为地震灾害发生后各相关部门有序地采取工程场地功能恢复措施，及时消除地震带来的不利影响，将工程场地迅速恢复至原有功能的能力。工程场地的震后恢复能力主要与地震危险性分析能力、资源保障能力及应急管理能力等因素有关。

(1) 地震危险性分析能力。地震危险性分析能力反映了政府部门对区域场地未来地震活动性及可能的地震地质灾害的类型、程度及分布情况的掌握程度，可用地震小区划编制的完善程度来衡量（刘莉，2009）。地震小区域划分（简称为“地震小区划”），包括地震动小区划和地震地质灾害小区划，指对某一特定区域范围内地震安全环境划分，预测这一范围内可能遭遇的地震影响分布。与全国地震区划相比，地震小区划更重视场地工程地质条件，尤其是局部场地条件对地震灾

害的影响。地震小区划可以为城市和工程震害的预测和预防、防震减灾规划、救灾措施的制定提供基础资料，有利于政府部门在震前和震后采取适当措施减少地震损失，快速恢复工程场地功能。通常，地震危险性分析能力越强，工程场地在震后恢复速度越快，工程场地抗震韧性也越高。

(2) 资源保障能力。资源保障能力是影响工程场地恢复能力的重要因素之一，可以通过经济发展水平和应急救援人员数量反映。过往震例中（张风华，谢礼立，2001），即使是损失相近的地震灾害，救灾投入的人力、物资也大有不同。经济发展水平高的城市和地区由于社会财富丰富，在恢复重建的过程中有足够的财力和物力投入，可有效使用的社会资源较多，工程场地功能恢复的速度也更快。同时，地震发生后应急救援人员可以第一时间快速奔赴震灾现场进行救援，也能减轻地震损失，为恢复重建争取时间。综上所述，工程场地所在城市或区域的资源保障能力越强，工程场地的震后恢复能力就越强，抗震韧性也越高。

(3) 应急管理能力。地震应急预案的完备程度和地震应急演练情况可以反映相关部门的应急管理能力。建立较为完备的地震应急预案，定期举行地震应急演练，能够有效增强应急行动的时效性，地震灾害发生后能够按照预定的行动方案快速、有效地处置，从而大大减轻地震灾害，缩短工程场地的恢复时长。地震应急预案越完备，定期开展地震应急演练的频率越高，相关部门的应急管理能力就越强，工程场地的抗震韧性也越高。

3 工程场地抗震韧性评价指标体系

3.1 评价指标体系建立的基础

工程场地的抗震韧性主要表现在稳定性和迅速恢复至稳定状态的能力。因此，工程场地抗震韧性的评价主要有两个方面：工程场地稳定性的韧性水平评价和工程场地震后恢复能力的韧性水平评价，评价指标应围绕这两个方面进行选取。选取评价指标时，应做到有据可依，并按代表性、独立性、可比性、可行性等原则确定，具体依据见表1。

表 1 指标选取参考依据

Tab. 1 Definition of resilience in different disciplines	
类别	名称
规范	《软土地区岩土工程勘察规程》(JGJ 83—2011)
	《岩土工程勘察规范 (2009 年版)》(GB 50021—2001)
	《城市综合防灾规划标准》(GB/T 51327—2018)
	《工程场地地震安全性评价》(GB 17741—2005)
	《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)
标准	《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591—2020)
	《城市工程系统抗震韧性评价导则》(RISN - TG041—2022)
	《活动断层与区域地壳稳定性调查评价规范》(DD 2015—02)
	《场地地质灾害危险性评估技术要求 (试行)》(T/CAGHP 025—2018)
	薄景山等 (2022): 场地韧性的概念及有关问题的讨论
文献	刘莉 (2009): 城市防震减灾能力标定及可接受风险评估
研究	周燕国等 (2020): 基督城易液化场地震后小应变剪切刚度演化规律研究

3.2 评价指标体系构建

衡量工程场地的抗震韧性需要构建一套评价工程场地抗震韧性的指标体系, 评价指标是衡量

一个工程场地抗震韧性的尺度, 构建工程场地抗震韧性评价指标体系是实现工程场地抗震韧性评价研究的核心内容。

目前, 国内外关于工程场地评价指标的研究还处于初步探索阶段, 本文通过分析相关文献以及国家规范标准, 咨询岩土抗震、工程抗震、城市防灾减灾等领域专家, 提取并筛选工程场地抗震韧性的影响因素, 以稳定性和恢复力作为一级指标, 构建了包含 7 个二级指标和 19 个三级指标的工程场地抗震韧性评价指标体系, 见表 2。

在未来的研究中, 可将三级指标量化并给出评分标准, 并运用层次分析法确定各指标的权重用于后续韧性评估。进行工程场地抗震韧性评价时, 政府管理部门可以组织具有工程地质及地球物理专业背景的工程师组建评估团队, 通过收集政府部门统计数据和现场场地勘察资料等方法, 确定各评价指标的信息, 然后根据各指标的评分标准给出其评分, 将各指标得分加权求和可得到工程场地抗震韧性的总得分, 依据总得分可将工程场地划分为不同的抗震韧性等级。

表 2 工程场地抗震韧性评价指标体系

Tab. 2 An indicator system of the seismic resilience assessment of engineering sites			
一级指标	二级指标	三级指标	指标说明
稳定性	场地条件及特征参数	地形地貌	地形地貌越简单, 工程场地抗震韧性越高
		岩土类型	坚硬场地较软弱场地的抗震韧性要高
		水文地质条件	地下水埋藏越浅, 工程场地抗震韧性越低
		覆盖层厚度	覆盖土层越薄, 工程场地抗震韧性越高
		等效剪切波速	土层等效剪切波速越大, 工程场地抗震韧性越高
	地震危险性	活动断层	无活断层通过和远离活断层的工程场地抗震韧性较高
		地震动峰值加速度	地震动峰值加速度分区值小的工程场地抗震韧性较高
		地震动加速度反应谱特征周期	地震动加速度反应谱特征周期分区值小的工程场地抗震韧性较高
	地震地质灾害	砂土液化	存在土层液化潜在风险的工程场地, 抗震韧性较低
		软土震陷	存在软土震陷潜在风险的工程场地, 抗震韧性较低
		滑坡与崩塌	存在滑坡与崩塌潜在风险的工程场地, 抗震韧性较低
恢复力	工程对场地的功能要求	工程对地基功能要求	工程对场地的地基功能要求越高, 满足这一条件的工程场地抗震韧性越高
		工程对环境功能要求	工程对场地环境功能要求越高, 满足这一条件的工程场地抗震韧性越高
	地震危险性分析能力	地震动小区划	编制过地震动小区划的工程场地抗震韧性较高
		地震地质灾害小区划	地震地质灾害小区划编制完善程度高的工程场地抗震韧性较高
	资源保障能力	经济发展水平	恢复过程中财力物资投入大的工程场地抗震韧性较高
		应急救援人员	可调用应急救援人员数量越多, 工程场地抗震韧性越高
	应急管理能力	地震应急预案	若某工程场地所在地区地震应急预案较为完备, 则该工程场地抗震韧性较高
		地震应急演练	若某工程场地所在地区定期举行地震应急演练的频次较高, 则该工程场地抗震韧性较高

4 结论

本文阐述了工程场地抗震韧性的定义,分析了工程场地抗震韧性的影响因素,并构建了工程场地抗震韧性指标评价体系,主要得出以下结论:

(1) 工程场地的抗震韧性既表现为其本身抵抗吸收地震灾害的能力,又表现为震后通过有限资源实现快速恢复的能力,本文认为工程场地抗震韧性包括抗震稳定性和震后恢复能力两方面的内容,韧性也是这两种能力的综合。

(2) 对工程场地抗震韧性做定量评价,首先应该建立工程场地抗震韧性评价指标体系,在此基础上可利用合理的评价方法给出工程场地的抗震韧性等级。

工程场地的组成和构造极为复杂,其抗震韧性是一个比较新的概念,本文的研究工作只是工程场地抗震韧性评价研究的起步,以下问题尚需进一步研究和探索:

(1) 工程场地抗震韧性的概念及评价指标体系需在实践中进一步检验和完善。

(2) 各级评价指标的权重有待确定,该权重反映了各指标对工程场地抗震韧性的影响大小。

(3) 各三级指标的量化标准需参照各类国家规范标准给出,以便形成完整的工程场地抗震韧性评价方法。

(4) 在城市和重大基础设施抗震韧性评价中,应考虑工程场地抗震韧性的影响,并注重工程场地抗震韧性评价结果的运用。

参考文献:

- 薄景山,李琪,齐文浩,等. 2021. 场地条件对地震动和震害影响的研究进展与建议[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 51(5): 1295-1305.
- Bo J S, Li Q, Qi W H, et al. 2021. Research progress and discussion of site condition effect on ground motion and earthquake damage[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 51(5): 1295-1305. (in Chinese)
- 薄景山,张毅毅,薄涛,等. 2022. 场地韧性的概念及有关问题的讨论[J]. 世界地震工程, 38(3): 1-9.
- Bo J S, Zhang Y Y, Bo T, et al. 2022. Concept of site resilience and discussion on relevant issues[J]. World Earthq Eng, 38(3): 1-9. (in Chinese)
- 皇甫岗. 2015. 2014年云南鲁甸6.5级地震[M]. 昆明: 云南科技出版社, 375-379.

- Huangfu G. 2015. The Ludian, Yunnan $M_s 6.5$ Earthquake in 2014[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 375-379. (in Chinese)
- 贾俊峰,魏博,杜修力,等. 2022. 从WCEE看国内外韧性抗震梁桥研究进展[J]. 交通运输工程学报, 22(6): 25-45.
- Jia J F, Wei B, Du X L, et al. 2022. Research progress of seismic resilient girder bridges at home and abroad from WCEE[J]. J Traff Transp Eng, 22(6): 25-45. (in Chinese)
- 李倩,郭恩栋,李玉芹,等. 2019. 供水系统地震韧性评价关键问题分析[J]. 灾害学, 34(2): 83-88.
- Li Q, Guo E D, Li Y Q, et al. 2019. Key problems of seismic resilience evaluation of water supply system[J]. J Catastr, 34(2): 83-88. (in Chinese)
- 李小明. 2006. 工程场地地震安全性评价工作及相关技术问题[J]. 震灾防御技术, 1(1): 15-24.
- Li X J. 2006. Evaluation of seismic safety for engineering sites and relevant technical problems[J]. Technology For Earthquake Disaster Prevention, 1(1): 15-24. (in Chinese)
- 刘莉. 2009. 城市防震减灾能力标定及可接受风险研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- Liu L. 2009. Calibration capability of the urban seismic prevention and disaster mitigation & research on acceptable risk level[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 尚庆学,李吉超,王涛. 2019. 医疗系统抗震韧性评估指标体系[J]. 工程力学, 36(S1): 106-110.
- Shang Q X, Li J C, Wang T. 2019. Indicators system used in seismic resilience assessment of hospital system[J]. Engineering Mechanics, 36(S1): 106-110. (in Chinese)
- 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 2008. 汶川地震震害[M]. 上海: 同济大学出版社: 18-35.
- State Key Laboratory of Disaster Prevention in Civil Engineering, Tongji University. 2008. Earthquake damage of Wenchuan earthquake[M]. Shanghai: Tongji University Press, 18-35. (in Chinese)
- 翟长海,刘文,谢礼立. 2018. 城市抗震韧性评估研究进展[J]. 建筑结构学报, 39(9): 1-9.
- Zhai C H, Liu W, Xie L L. 2018. Progress of research on city seismic resilience evaluation[J]. J Build Struc, 39(9): 1-9. (in Chinese)
- 张风华,谢礼立. 2001. 城市防震减灾能力评估研究[J]. 自然灾害学报, (4): 57-64.
- Zhang F H, Xie L L. 2001. Study on evaluation of city's ability reducing earthquake disasters[J]. J Nat Disaster, (4): 57-64. (in Chinese)
- 张毅毅. 2022. 城市场地抗震韧性评价指标和评价方法[D]. 三河: 防灾科技学院.
- Zhang Y Y. 2022. Evaluation index and evaluation method of seismic resilience of city site[D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention. (in Chinese)
- 周燕国,沈涛,王越,等. 2020. 基岩城易液化场地震后小应变剪切刚度演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 42(8): 1411-1417.
- Zhou Y G, Shen T, Wang Y, et al. 2020. Post-earthquake evolution of small-strain shear stiffness at liquefiable deposit in Christchurch[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 42(8): 1411-

1417. (in Chinese)
- 周颖,赵佳美,肖意. 2023. 基于不同评价标准的屈曲约束支撑-钢框架建筑抗震韧性评价研究[J]. 建筑结构学报,44(4):204-215.
- Zhou Y,Zhao J M,Xiao Y. Study on seismic resilience assessment of BRB-steel frame building based on various assessment standards [J]. J Build Struc,44(4):204-215. (in Chinese)
- 宗成才,冀昆,温瑞智,等. 2021. 城市燃气管网三维度抗震韧性定量评估方法[J]. 工程力学,38(2):146-156.
- Zong C C, Ji K, Wen R Z, *et al.* 2021. Three-dimensional seismic resilience quantification framework for the urban gas network. [J]. Engineering Mechanics,38(2):146-156. (in Chinese)
- 俎林,黄勇. 2020. 维修加固桥梁的抗震韧性评价方法[J]. 地震研究,43(3):522-530.
- Zu L,Huang Y. 2020. Evaluation method for seismic resilience of maintenance bridges[J]. J Seismol Res,43(3):522-530. (in Chinese)
- DD 2015—02,活动断层与区域地壳稳定性调查评价规范[S].
- DD 2015—02,Code for investigation and evaluation of active faults and regional crustal stability[S]. (in Chinese)
- GB 17741—2005,工程场地地震安全性评价[S].
- GB 17741—2005,Evaluation of seismic safety for engineering sites[S]. (in Chinese)
- GB 18306—2015,中国地震动参数区划图[S].
- GB 18306—2015,Seismic ground motion parameter zonation map of China[S]. (in Chinese)
- GB/T 38591—2020,建筑抗震韧性评价标准[S].
- GB/T 38591—2020,Standard for seismic resilience assessment of buildings[S]. (in Chinese)
- GB/T 51327—2018,城市综合防灾规划标准[S].
- GB/T 51327—2018,Standard for urban planning on comprehensive disaster resistance and prevention[S]. (in Chinese)
- GB 50011—2010,建筑抗震设计规范(2016年版)[S].
- GB 50011—2010,Code for seismic design of buildings(2016)[S]. (in Chinese)
- GB 50021—2001,岩土工程勘察规范(2009年版)[S].
- GB 50021—2001,Code for investigation of geotechnical engineering(2009)[S]. (in Chinese)
- JGJ 83—2011,软土地区岩土工程勘察规程[S].
- JGJ 83—2011,Specification for geotechnical investigation in soft clay area[S]. (in Chinese)
- RISN-TG041—2022,城市工程系统抗震韧性评价导则[S].
- RISN-TG041—2022,Guideline for evaluation of seismic resilience assessment of urban engineering systems[S]. (in Chinese)
- T/CAGHD 025—2018,场地地质灾害危险性评估技术要求(试行)[S].
- T/CAGHD 025—2018,Technical requirement of risk assessment for area geological hazard[S]. (in Chinese)
- Alexander D E. 2013. Resilience and disaster risk reduction:an etymological journey [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,13(11):2707-2716.
- Bruneau M,Chang S E,Eguchi R T,*et al.* 2003. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectras,19(4):733-752.
- Cimellaro G P,Renschler C,Reinhorn A M,*et al.* 2016. PEOPLES: a framework for evaluating resilience[J]. Journal of Structural Engineering,142(10):04016063.
- Jacques C C,McIntosh J,Giovinazzi S,*et al.* 2014. Resilience of the Canterbury hospital system to the 2011 Christchurch earthquake[J]. Earthquake Spectra,30(1):533-554.

The Indicator System Used in Seismic Resilience Assessment of Engineering Sites

LEI Jiyong^{1,2}, GONG Maosheng^{1,2}, ZHAO Yinan^{1,2}

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

(2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

The concept of seismic resilience of engineering sites is expounded. Based on the two resilience characteristics—stability and resilience, the influence of site conditions and characteristic parameters, seismic hazard, seismic geological hazard, functional requirements of the engineering to the site, seismic hazard analysis ability, resource support ability, emergency management ability on the engineering sites, seismic resilience is analyzed. On this basis, the evaluation index system of seismic resilience of engineering site is constructed. By using the assessment indicator system and reasonable assessment method, the quantitative assessment of seismic resilience of engineering sites can be realized.

Keywords: engineering site; seismic resilience; stability; resilience; indicator system