

引用格式:冉保,黄选明,卢宇飞,等.美国既有建筑抗震鉴定评估标准体系演进及与中国对比[J].工业建筑,2026,56(5):47-56. RAN Yu, HUANG Xuanming, LU Yufei, et al. Evolution of the U. S. Seismic Evaluation Standard System for Existing Buildings and a Comparative Analysis with China[J]. Industrial Construction, 2026, 56(5):47-56 (in Chinese). DOI:10. 3724/j. gyjzG25031105

美国既有建筑抗震鉴定评估标准体系演进及与中国对比^{*}

冉 保^{1,2,3} 黄选明^{1,2,3} 卢宇飞^{1,2,3} 张新江^{1,2,3}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司,北京 100013;2. 建研院检测中心有限公司,北京 10013;3. 国家建筑工程技术研究中心,北京 100013)

摘 要 介绍了美国既有建筑标准体系和抗震鉴定评估技术方法,并对 FEMA P-154-2015 快速视觉筛查法和 ASCE/SEI 41-23 三级评估流程进行了重点阐述。美国对于既有建筑的整治,采用“分级筛查—差异化评价—针对性加固”的分级模式,具有灵活、高效等优势,但也有其局限性。对比中美两国标准,结合我国实际提出:定义“基准建筑”简化评价流程;完善性能化评估方法作为传统鉴定方法的补充等建议,为“一带一路”建设项目提供技术参考,也为既有建筑的科学规范管理以及城市更新提供思路。

关键词 既有建筑;标准体系;抗震鉴定;性能化评估;FEMA P-154-2015;ASCE/SEI 41-23;快速筛查;城市更新

Evolution of the U. S. Seismic Evaluation Standard System for Existing Buildings and a Comparative Analysis with China

RAN Yu^{1,2,3} HUANG Xuanming^{1,2,3} LU Yufei^{1,2,3} ZHANG Xinjiang^{1,2,3}

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. CABR Testing Center Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013, China)

Abstract: This paper introduces the U. S. standard system for existing buildings, analyzes the seismic evaluation techniques, and focuses on the FEMA P-154-2015 rapid visual screening method and the ASCE/SEI 41-23 three-level evaluation process. The United States adopts a grading mode characterized by “graded screening, differentiated evaluation, and targeted reinforcement” for the governance of existing buildings. This mode offers the advantages of flexibility and high efficiency, while also having certain limitations. By comparing the standards of the two countries and considering China’s actual conditions, this paper proposes recommendations, such as defining benchmark buildings to simplify the evaluation process and improving performance-based assessment methods to complement traditional appraisals. It aims to provide technical references for construction projects under “the Belt and Road” initiative, thereby offering insights for the scientific and standardized management of existing buildings as well as for urban renewal.

Keywords: existing buildings; standard system; seismic appraisal; performance-based evaluation; FEMA P-154-2015; ASCE/SEI 41-23; rapid screening; urban renewal

^{*} 国家重点研发计划(2023YFC3804300, SQ2024YFC3800248)。

第一作者:冉保,硕士,高级工程师,一级建造师,一级注册结构工程师,主要从事建筑鉴定与加固研究, 2426527669@qq. com。

通信作者:黄选明,博士,研究员,主要从事建筑鉴定与加固研究, huangxuanming@cabr. com. cn。

收稿日期:2025-03-11

0 引言

与我国既有建筑现状类似,欧盟和美国同样面临着既有建筑老龄化带来的安全运维与治理挑战。2019年,欧盟联合研究中心(JRC)发布的研究报告指出,欧盟范围内约85%的建筑建于2001年前,其中近40%建于1960年前^[1]。2018年,美国国家建筑科学研究院(NIBS)研究发现,美国现存的1.18亿户住宅和560万栋商业建筑平均房龄已达41.7年^[2]。截至2024年,美国仍有55%的住宅和46%的商业建筑建于1984年前^[3-4]。2020年,美国联邦应急管理局(FEMA)的一项研究指出,全美65%的行政区域仍在用过时的建筑规范,迫切需要更新规范以应对现代地震的威胁^[5]。

2024年,美国地质调查局(USGS)发布的《国家地震危险模型(NSHM)》进一步证实了这一问题的紧迫性。模型预测未来100年内,全美50个州均存在地震风险,75%的区域和2.3亿人处于潜在地震威胁之中^[6];25个州可能发生中高概率破坏性地震动,除加利福尼亚、阿拉斯加和夏威夷等传统高风险地区外,还新增了中东部地区的纽约、华盛顿、伊利诺伊和得克萨斯。2023年,USGS联合FEMA的一项研究指出,美国每年因地震导致建筑物损毁的直接经济损失高达147亿美元^[7]。

面对既有建筑的老龄化和地震风险,美国根据理论研究成果及震害经验,建立了较完备的建筑标准体系,其技术方法和工程经验被许多国家特别是“一带一路”沿线国家直接采用或借鉴。本文将介绍美国既有建筑标准体系,梳理既有建筑抗震鉴定评估的技术方法,重点阐述FEMA P-154快速视觉筛查法和ASCE/SEI 41三级评估流程,分析美国性能化方法的优势与局限,最后对比中美两国标准并结合我国实际,提出相关建议。

1 美国建筑标准体系简述

美国建筑标准通常由美国国际规范委员会(ICC)、美国土木工程师学会(ASCE)等非营利组织制定,经美国国家标准学会(ANSI)认证后上升为国家标准,标准以市场化为主导,采用三级体系:最高层级为法规统领层的模式规范(Model Code),第二层级为技术支撑层的共识标准(Consensus Standard),第三层级为理论基础层的资源文件(Resource Document)。

美国是联邦制国家,州政府拥有立法权,可制

定适用于本州范围的强制性规范,地方政府在州法律框架下可进一步细化或补充,规范需经州和地方政府立法后具有法律强制力。联邦政府仅直接管辖联邦投资项目,通过政策引导的方式鼓励州和地方政府采用最新规范。一些州积极推进相关最新版本规范的实施,而部分州可能会因为财政、自身的规划和发展需求,优先制定和推广适用于本州范围内的规范,有时会和美国联邦应急管理局(FEMA)倡导的某些规范存在差异或者滞后。当某个州或地方政府决定采用某一项或几项规范后,会通过立法或行政规定等方式将这些规范纳入当地的法律体系,使其成为当地建筑活动必须遵守的强制性要求,即要求所有建筑项目必须符合这些规范的要求,否则无法获得施工许可或通过验收。美国建筑标准体系层级如表1所示。

表1 美国建筑标准体系层级
Table 1 Hierarchy of the U.S. building standard system

层级	典型文件示例	法律效力适用范围	制定部门
模式规范 (Model Code)	IBC、IRC、 IEBC、IFC、 NFPA 5000、 NFPA 101	立法采纳后具有法律强制力,适用于采纳的州和地方政府	ICC、 NFPA等
共识标准 (Consensus Standard)	ASCE/SEI 7、 ASCE/SEI 41、 ACI 318、 ACI 562、 AISC 360、 AISC 341、 AISC 342	模式规范引用后具有法律强制力,未被引用时作为行业推荐标准,适用于工程设计、施工等具体领域	ASCE、 ACI、 AISC等
资源文件 (Resource Document)	FEMA 154、 ASCE/SEI 41 配套说明文件、 NFPA 标准的研究报告	通常无法律强制力,解释标准或规范背景 and 原理,作为技术参考	FEMA、 ATC、 ASCE等

1.1 模式规范(Model Code)

模式规范(Model Code)由美国国际规范委员会(ICC)和美国国家消防协会(NFPA)等组织制定,提供统一的技术框架,规定行业重大技术原则和普遍性要求,被美国大多数州和地方政府采用。

1994年,为解决全美各地使用规范不一致导致标准冲突和效率低下的问题,美国将三家区域性建筑规范组织合并,成立了美国国际规范委员会(ICC)。这三家区域组织是成立于1915年的建筑官员与规范管理者联合会(BOCA)、1922年的国际建筑官员联合会(ICBO)和1941年的南方建筑规范国际联合会(SBCCI)。ICC通常每三年更新一次规范,

以保证建筑安全符合控制底线要求,同时为新材料、新技术和新建筑设计创造应用条件。ICC 主要包括四大核心规范:适用于所有类型新建建筑的 IBC《国际建筑规范》,单双户住宅及不超过三层的联排住宅建筑的 IRC《国际住宅规范》,既有建筑进行改造、维修、扩建或用途变更的 IEBC《国际既有建筑规范》和所有类型建筑消防安全的 IFC《国际消防规范》^[8]。

美国国家消防协会(NFPA)成立于 1896 年,因其消防和设备标准而享誉全球。在 2000 年左右 NFPA 曾与 ICC 合作共同制定消防规范,后因理念不同而分开,并自行制定模式规范 NFPA 5000 主要建筑规范和 NFPA 101 消防规范。NFPA 模式规范的影响力不及 ICC 模式规范^[9]。

1.2 共识标准(Consensus Standard)

共识标准(Consensus Standard)由美国土木工程师学会(ASCE)、美国混凝土学会(ACI)、美国钢结构协会(AISC)等专业协会制定,规定具体的设计方法和施工要求。

美国土木工程师学会(ASCE)成立于 1852 年,是美国历史最悠久的国家级工程学会。众多 ASCE 标准广泛被美国联邦应急管理署(FEMA)及地方政府采用。例如 ASCE/SEI 7《建筑物和其他结构的最小设计荷载及相关标准》被纳入美国建筑规范强制条款,是荷载与抗震设计的“通用语言”,其内容包括恒荷载、活荷载、风荷载、雪荷载、地震作用等,无论是模式规范(Model Code)(IBC、IRC、IEBC 或 NFPA 5000),还是共识标准(Consensus Standard)(如 ACI 318、AISC 360 等)都利用 ASCE/SEI 7 计算荷载及荷载组合,被许多国家和地区作为建筑设计的基础规范;ASCE/SEI 41《既有建筑抗震性能评估与加固规范》,用于既有建筑的抗震性能评估和加固。

美国混凝土学会(ACI)成立于 1904 年,是美国混凝土结构领域的权威行业学会。ACI 318《建筑混凝土结构设计与施工规范》和 ACI 562《既有混凝土结构评估、修复和加固规范》ACI 标准,用于新建和既有混凝土结构的材料、设计、施工、评估、检测和加固等流程。

美国钢结构协会(AISC)成立于 1921 年,是美国钢结构领域的权威行业协会。AISC 标准 AISC 360《钢结构建筑规范》、AISC 341《钢结构建筑抗震规范》和 AISC 342《既有钢结构建筑抗震评估与加固

规定》用于新建和既有钢结构的材料、设计、施工、评估、检测和加固等流程。

1.3 资源文件(Resource Document)

资源文件(Resource Document)由技术指南(如 FEMA 154)、配套技术支撑文件(如 ASCE/SEI 41 配套说明文件)和研究成果(如 NFPA 标准研究报告)组成,为标准规范提供理论支撑和案例参考。例如 FEMA 154《建筑物潜在地震危险快速目视筛查》技术指南,用于快速评估建筑地震风险,其快速评估方法被 IEBC 采纳。

2 美国既有建筑评估与加固规定

美国既有建筑评估工作与中国的评估或者鉴定类似,下文将不再对两者进行特别区分。为更好地理解美国安全评估与加固的主要理念,有必要对 IEBC 2024《国际既有建筑规范》中所定义的“严重结构损坏”进行阐释,满足下列情况之一时即为“严重结构损坏”:1)任一楼层在任一水平方向的侧向承载能力较受损前降低超 33%;2)承受重力荷载的竖向构件(从属面积超结构楼屋面总面积 30%),承载力降低超过 20% 且剩余承载力不足 IBC 2024 对同类新建建筑要求的 75% 时;3)支撑屋顶面积占比超过 30% 的雪荷载构件,承载力降低超过 20% 且剩余承载力不足 IBC 2024 对同类新建建筑要求的 75% 时。

IEBC 2024 与 IBC 2024 根据是否超出严重结构损坏限值和其他关键指标,将建筑评估与加固工作划分为以下两种情形:1)需先进行评估,根据评估结果采取后续措施的情形(明显结构损伤、使用功能变更、抗侧力不足、历史建筑修复);2)允许直接修复的情形(非结构/轻微结构损伤、按原状修复、局部合规修复)。美国既有建筑评估与加固情况对照如表 2 所示。在美国,既有建筑的评估与加固通常分为三类:一是自愿行为,如租赁或居住适宜性评估、获得贷款或保险折扣、投资抗震的经济性决策等;二是特定法规强制要求,如危及公共安全的建筑、对社区震后恢复具有重要意义的建筑评估等;三是由其他行为触发,如增建、改建、用途变更、超过一定规模的维修等。

3 美国既有建筑抗震评估与加固

美国既有建筑的抗震评估与加固最早可追溯至 20 世纪 30 年代。1939 年加州颁布的《加里森法案》(Garrison Act),要求对 1933 年长滩(Long Beach)地

表 2 美国既有建筑评估与加固情况对照
Table 2 Comparison of evaluation and retrofiting status for existing buildings in the United States

场景分类	触发条件/允许条件	规范依据	关键规范说明
明显结构损伤	裂缝、倾斜率、地基沉降、火灾/地震损伤超限	IEBCASCE/SEI 41	IEBC 应急程序, ASCE/SEI 41-23 第三级性能评估
需先评估的情况	使用功能变更	IBCIEBC	IEBC 和 IBC 强制按新用途荷载组合校核 IEBC 单层面积<3000 m ² 且楼层总荷载增幅<10% 时可不评估
	抗侧力不足	ASCE/SEI 41IBC	ASCE/SEI 41 评估与加固 IBC 规定抗侧力体系最低要求
	历史建筑修复	IEBC	保留原始风貌前提下, 允许替代性合规方案, 并确保结构安全
可直接修复的情况	非结构构件/轻微结构损伤	IEBC	修复面积<单层 10% 且不影响结构安全, 无需评估直接修复
	按原状修复	IEBC	不得降低现有安全等级, 无需评估直接修复
	局部合规修复	IBC	修补区域≤5 m ² 且不改变传力路径, 无需评估直接修复

震前的学校建筑进行抗震评估,并要求未通过评估的建筑在 1975 年前完成加固或停止使用。根据该法案的要求,20 世纪 60 年代末至 70 年代初,加州大批学校陆续启动了抗震加固工程。1977 年美国国会通过《地震灾害减少法案》(Earthquake Hazards Reduction Act),首次在国家层面统筹地震风险管理,由美国联邦应急管理署(FEMA)、美国地质调查局(USGS)、美国国家科学基金会(NSF)和美国国家标准技术研究院(NIST)联合实施国家地震减灾计划(NEHRP)。从 1984 年开始,FEMA 推行全国性老旧建筑地震风险减灾项目,开发了 FEMA 154 快速视觉筛查等多种技术资源,逐步形成了美国既有建筑抗震评估与加固的标准体系。

3.1 RVS 快速视觉筛查介绍

1988 年发布的 FEMA 154-1988《建筑物潜在地震危害快速视觉筛查手册》(简称“RVS 快速视觉筛查”),提出了允许在不进入建筑内部的前提下,快速评估大量建筑抗震性能的方法。该方法在发布后的十年间,被广泛用于评估全美超过 70000 栋建筑,为地震灾害资金分配与风险防控提供了决策依据^[10]。1989 年加州洛马普雷塔(Loma Prieta)地震和 1994 年洛杉矶北岭(Northridge)地震后,美国国家地震减灾计划(NEHRP)推动了 FEMA 154 分别在 2002 年和 2015 年完成两次更新,2015 年版更名为 FEMA P-154-2015。

FEMA P-154-2015 规定筛查分为两级筛查。第 1 级筛查用于快速识别潜在风险建筑,通常由具备建筑设计和建造基本知识的人员完成。第 2 级

筛查用于进一步对高风险建筑进行评估或补充关键数据,由具备建筑抗震评估或结构设计专业知识的结构工程师进行。第 1 级筛查是必须进行的,第 2 级筛查由评估人员根据建筑实际状况决定是否执行。由于第 2 级筛查采用更详细的修正因子(如量化结构的不规则性)和增加了非结构构件的评估,可在第 1 级筛查的基础上修正最终得分。

进行 RVS 快速视觉筛查时,评估人员根据五级(极低、低、中等、高、极高)地震动等级选择不同的评分表,然后根据不同结构类型(如木框架、钢结构、无筋砌体等)的建筑抗震性能确定基础分数(basic score),并由场地类别、结构不规则性、建造年代、地质灾害、建筑层数和加固情况等因素确定评分修正因子(score modifiers),最后综合计算建筑抗震性能的最终得分。即最终得分越低,代表建筑在最大考虑地震(MCER)下的倒塌风险越高。对于得分低的建筑,可根据 ASCE/SEI 41-23 进行详细评估。如需评估非结构构件性能,可参考 FEMA E-74《减少非结构性地震损害风险:实用指南》的规定。RVS 快速视觉筛查实施流程如图 1 所示。

RVS 快速视觉筛查通常在建筑外部进行,由于时间限制或无法进入室内检查,评估人员通常无法检查被建筑装饰覆盖的关键抗震构件,存在潜在的安全隐患。且该方法未进行材料强度、钢筋配置等现场检测,也未进行详细的结构分析,可能存在评估结果与建筑实际状况不符,存在错判和漏判风险。虽然 RVS 快速视觉筛查准确性不及 ASCE/SEI 41 等

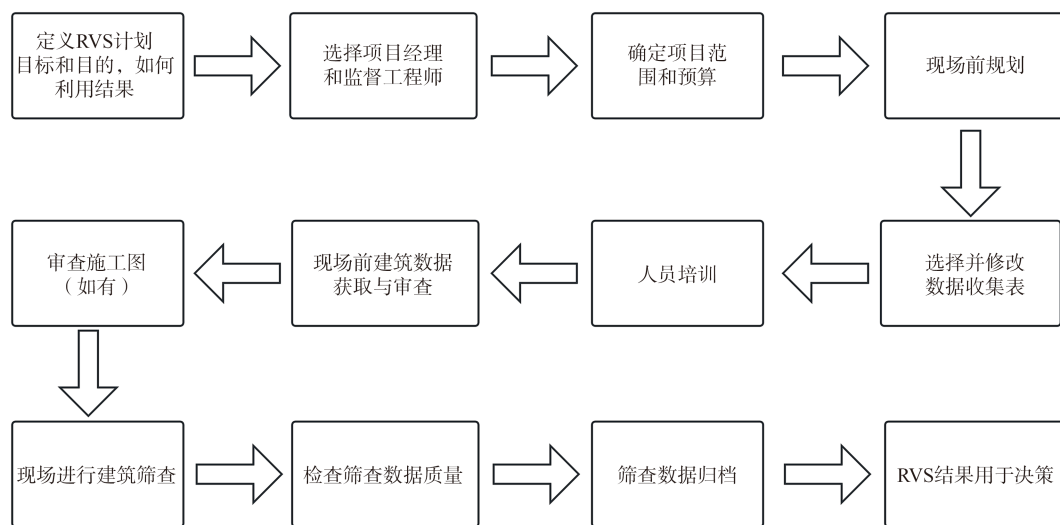


图 1 RVS快速视觉筛查实施流程

Fig. 1 Implementation process of rapid visual screening

详细评估方法,但凭借快速简便的优势,被广泛应用于地震前后大规模建筑的初步筛查,为防灾减灾提供决策依据。

3.2 ASCE/SEI 41 介绍

1987年发布的 ATC 14-1987《既有建筑抗震评估》提出了基于震害调查的缺陷识别方法,1997年 FEMA 273-1997《国家地震减灾计划建筑抗震修复指南》引入了基于性能的加固设计和非线性分析方法。ATC 14-1987 与 FEMA 273-1997 均为具有里程碑意义的文件,在两者发布前既有建筑抗震评估与改造主要依赖于从业者的个人经验,并直接套用新建建筑设计标准,缺乏专门针对既有建筑的技术标准。联邦紧急事务管理署(FEMA)通过修订 ATC 14-1987 形成 FEMA 178-1992,升级 FEMA 273-1997 为 FEMA 356-2000,最终推动其转化为 ASCE 41 系列标准。

2003年发布了 ASCE/SEI 31-03《既有建筑抗震评估》,由1998年发布的 FEMA 310-1998《建筑地震评估手册:预标准》演变而来,整合了建筑设计专业人员在既有建筑抗震评估领域的工程经验。2007年发布了 ASCE/SEI 41-06《既有建筑抗震评估与加固》,由1998年发布的 FEMA 356-1998《建筑物抗震修复预标准及评论》演变而来,整合了既有建筑结构分析、设计评估和加固的许多经验,并吸收了实验室试验成果和地震破坏的现场观察结果,提出了更深入的评估及加固方法。ASCE/SEI 31-03 主张对既有建筑的抗震性能采取相对宽松的评估标准,即评估既有建筑时应予以放宽,不应将其与新建建筑同等

对待。而 ASCE/SEI 41-06 主张对既有建筑的抗震性能采取严格的评估标准,若选择抗震加固,应尽可能将性能提升至与新建建筑相当的水平(即“基本安全目标”)^[11]。由于两者的巨大差异,2013年 ASCE 41-06 与 ASCE 31-03 被合并为 ASCE 41-13《既有建筑抗震评估与加固标准》,主要采用对既有建筑抗震性能采取相对宽松评估的理念(但也保留与新建建筑标准等效性能目标的选项),协调了评估和加固程序。合并后标准基于的理念是,在程序上评估与加固设计并无本质区别,加固设计实际上就是对处于改变状态的建筑进行评估,并调整这些改变,直至建筑评估符合期望性能目标。2017年更新为 ASCE/SEI 41-17,最新版本为 2023 年发布的 ASCE/SEI 41-23《既有建筑抗震评估与加固标准》。

ASCE/SEI 41-23 提供了一种基于性能的抗震评估和加固方法,适用于建筑结构及其非结构组件(包括天花板、隔墙、机械、电气和管道系统)。ASCE/SEI 41-23 标准根据建筑安全等级、倒塌风险及与新建建筑规范协调性等因素,将抗震性能目标分为基本型(BPOE)、增强型(NBPOE)、限制型(LPOE)或等效于新建建筑性能目标(BPON)。并基于建筑的风险类别和地震危险水平,将结构性能水平分为立即入住(IO)、损伤控制(DC)、生命安全(LS)、有限安全(LF)、防止倒塌(CP)、未考虑(NC),将非结构性能水平分为可运行(N-A)、位置保持(N-B)、生命安全(N-C)、危害降低(N-D)、未考虑(N-E)。

等效于新建建筑性能目标(BPON)用于需要进行相当于新建建筑评估或加固时使用,通过风险类

别划分、ASCE 7一致的地震参数及系统性评价方法,为既有建筑提供了与新建筑等效的抗震性能。与新建建筑性能目标(BPON)相比,基本型(BPOE)接受较低的安全水平和较高的倒塌风险。通常情况既有建筑抗震性能目标采用基本型(BPOE),主要原因为:1)允许最近建造的既有建筑在设计标准发生细微变化时不会立即变得不符合标准;2)建筑遭遇地震的风险大小与其工作年限有关。既有建筑的剩余工作年限短于新建建筑,遭遇同等强度地震作用的概率比新建建筑低;3)为达到与“新建建筑”同等性能,需要的成本往往与其增加的效益不成比例。对于特定建筑并未明确规定选择何种性能目标,而是用户考虑政策法规、项目成本、可行性,以及在未来地震发生时通过提高安全性、减少财产损失和中断使用所能获得的效益等因素后综合确定。即如果用户希望在评估或改造中接受更高的倒塌风险或较低的性能水平,那么用户必须明确选择较低的地震危险性或较低的性能水平,并承受决策带来的风险。

评估分为三级且由具备抗震设计经验的专业工程师进行,根据既有建筑的不同状态选定不同级别:第1级(Tier 1)筛查、第2级(Tier 2)基于缺陷的简单评估和第3级(Tier 3)系统评估。第1级(Tier 1)筛查和第2级(Tier 2)基于缺陷的简单评估适用于常见建筑类型及限制条件的建筑,评估过程必须从第1级(Tier 1)筛查开始。

第1级(Tier 1)筛查进行构造检查和基准规范符合性验证后,如果建筑被判定为基准建筑,则可不进行后续复杂的分析,大幅降低评估工作量,即认为符合既有建筑基本性能目标(BPOE)的结构抗震性能水平。基准建筑是指符合特定版本抗震设计规范(如UBC、IBC等)或经抗震加固的建筑,能够达到生命安全(LS)或即时入住(IO)等性能目标。如需评价建筑是否符合更高级别的等效于新建建筑性能目标(BPON),则需开展专项分析,不能仅依据基准判定。评估人员也可以不使用基准判定直接进行结构第1级(Tier 1)筛查或更详细评估。由于非结构构件的设计、安装或修改通常没有执行适用的建筑规范,基准判定也不适用于非结构构件的评估。

对于第1级(Tier 1)筛查不满足基准建筑时,则按规定继续进行评估,如第1级(Tier 1)筛查发现建筑存在潜在缺陷则需进行第2级(Tier 2)评估。第2级

(Tier 2)评估仅对不符合第1级(Tier 1)的潜在缺陷进行简化线性分析。如果符合要求,则该建筑被视为符合所选的性能目标;如果评估仍不符合要求,评估人员可选择结束评估并上报缺陷,或继续进行第3级(Tier 3)评估。Tier 3评估需进行现场调查(仅必要时进行材料强度等检测),根据建筑的实际情况选择线性静力(LSP)、线性动力(LDP)、静力非线性(NSP)或动力非线性(NDP)^[12]分析方法。如果主管部门不允许使用Tier 1和Tier 2,或评估人员认为有必要进行更详细评估,则进行Tier 3评估。ASCE/SEI 41评估实施流程如图2所示。

通常Tier 1筛查采用更严格标准和更简单的现场工作,会识别出比Tier 2更多潜在风险建筑。Tier 3评估可能将不符合Tier 2评估要求的建筑重新评价为符合要求。尽管Tier 3评估实施过程复杂、耗时、专业性要求高且成本高昂,但通过Tier 3评估可以证明某些建筑性能满足规范要求(即使常规方法判定为不安全),节约加固整治的成本往往超评估成本的数倍乃至数十倍。有时即使Tier 3评估的计算模型满足规范要求,但由于允许评估人员在建模方法(如选择纤维截面模型或集中塑性铰模型)、参数及分析软件选择(如SAP 2000、ETABS、OpenSEES、PERFORM-3D等)上具有较大自主权,可能导致同一建筑采用不同合规模型时出现显著差异,极端情况下甚至得出相互矛盾的结论^[13]。

3.3 其他标准介绍

1)通用评估类。

FEMA P-58:2012年发布的FEMA P-58-2012《建筑抗震性能评估方法》,首次提出了基于概率理论的抗震性能评估方法,通过量化建筑在地震中可能产生的人员伤亡(死亡、重伤)、直接经济损失(修复、重建成本)和间接损失(修复时间、被贴上不安全标志导致的损失)等综合评价建筑抗震性能。评估结果以所有权人、使用人、管理人等建筑利益相关者易于理解的方式呈现,便于利益相关者根据评估结果合理决策以进行修复或重建。最新版本为2018年发布的FEMA P-58-2018^[14],细化了性能指标要求,并新增了非结构构件评估等内容。

FEMA E-74:鉴于非结构构件在建筑总成本中占比高达75%~80%,且在地震中易发生损害,2012年发布了FEMA E-74-2012《减少非结构性地震损害风险实用指南》。该指南以简明易懂的方式解释了非结构构件在地震中的损害来源,包括超70种非结

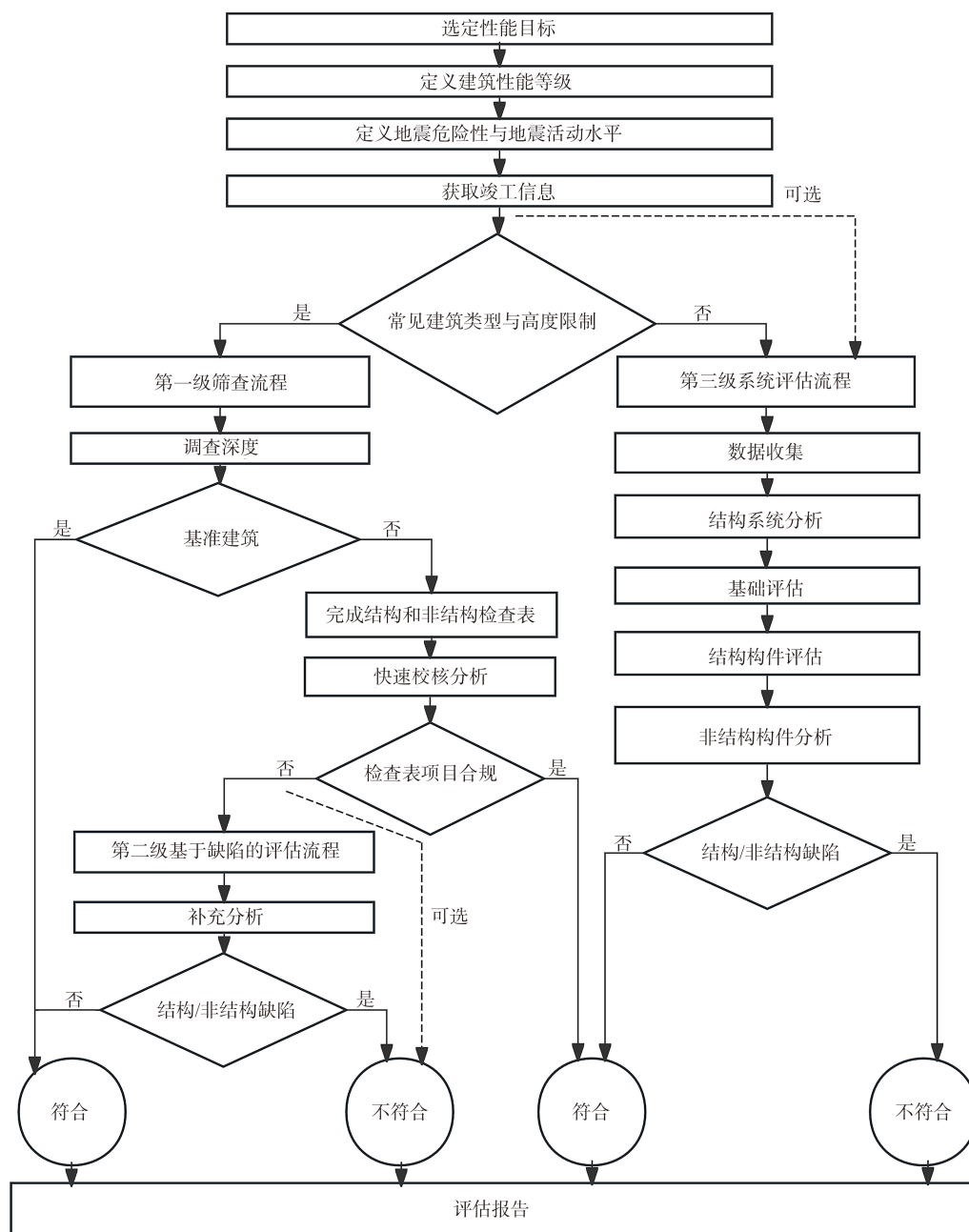


图 2 ASCE/SEI 41 评估实施流程

Fig. 2 Implementation process of ASCE/SEI 41 evaluation

构构件示例,配有实际损坏照片,并提供降低风险的方法,特别适用于RVS快速视觉筛查发现潜在缺陷后进行的详细评估。

2) 灾害损失评估类。

HAZUS-MH:HAZUS-MH是由FEMA主导开发用于估算地震等灾害风险损失评估的软件,自1997年首次发布以来,该软件经过多次更新,最新版本为2024年发布的Hazus 4.2 SP2。

3) 抗震加固技术类。

FEMA 547:2006年发布的FEMA 547-2006《既有建筑抗震加固技术》,系统总结了混凝土结构、钢结构、木结构等常见建筑结构的常见缺陷及修复技术,配有大量图示以便理解和操作,尽管发布近20年,其技术方法仍被ASCE/SEI 41-23等最新规范大量引用。

4) 震后建筑评估与修复类。

ATC-20-1:1989年发布的ATC-20-1989《现场手册:震后建筑安全评估》,首次提出了包含快速评

估(外部目视检查)和详细评估(结构分析)的两级流程。2015年修订版ATC-20-1-2015新增数字化工具应用指南。

ATC-52-4:2010年发布的ATC-52-4-2010《今日在此——明日在此:旧金山地震韧性之路:地震后修复与改造要求》,尽管该报告是针对旧金山制定,但其中的方法和建议也适用于其他地震区建筑评估和修复加固。

FEMA 352:2000年发布的FEMA 352-2000《焊接钢抗弯框架建筑震后损伤评估与修复推荐标

准》,为震后受损钢框架结构的评估和修复提供指导。

FEMA 306、307、308:1998年发布的FEMA 306-1998《地震受损混凝土和砌体墙建筑评估:基本程序手册》、FEMA 307-1998《地震受损混凝土和砌体墙建筑评估:技术资源》和FEMA 308-1998《地震受损混凝土和砌体墙建筑的修复》,用于地震受损混凝土和砌体墙建筑的评估、技术支持和修复。美国地震评估主要方法比较如表3所示。

表3 美国地震评估主要方法比较

Table 3 Comparative analysis of major seismic evaluation methods in the United States

未受损建筑	地震受损建筑	所需时间	相对成本	评估精度	资格要求
FEMA P-154	ATC-20 快速	分钟级	低	一般	培训后具有相关知识的人员
ASCE/SEI 41 Tier 1	ATC-20 详细	小时级	低	一般	具有抗震评估和设计经验的结构工程师
ASCE/SEI 41 Tier 2	FEMA 352、ATC-52-4	天级	较高	较高	具有抗震评估和设计经验的结构工程师
ASCE/SEI 41 Tier 3、FEMA P-58、HAZUS	FEMA 306、ATC-52-4	周级	高	高	具有抗震评估和设计经验的结构工程师

4 美国抗震规范与中国对比

2000年后,IBC将全美范围内的极限地震统一调整为最大考虑地震(MCE),其50年超越概率2%,并将设计地震(DBE)设定为MCE的2/3,即相当于重现期约为1000年,从而使全美建筑结构防倒塌风险趋于一致^[15-16]。MCE大致对应中国的“大震”,而DBE则接近“中震”水平。

中国以“三水准设防、两阶段设计”作为抗震设计的基本准则。第一阶段通过小震弹性计算、概念设计和构造措施规定,实现“小震不坏、中震可修”的目标;第二阶段则通过大震弹塑性变形验算,以确保“大震不倒”。与中国有所不同,美国抗震设计利用风险系数(2/3)将MCE转换为DBE,通过反应修正系数(R 值)区分不同结构延性水平,如特殊钢筋混凝土剪力墙 $R=5$,普通素混凝土墙 $R=3$,结合位移放大系数(C_d)、超强系数(Ω_0)等参数,验算结构非弹性变形能力,并考虑材料与细部要求等构造措施,最终实现预定的建筑抗震性能目标,实现“小震功能正常、中震生命保护、大震防倒塌”的目标,满足了各层次的设防需求。

中国采用GB 55021—2021《既有建筑鉴定与加固通用规范》、GB 50292—2015《民用建筑可靠性鉴定标准》、GB 50144—2019《工业建筑可靠性鉴定标准》和GB 50023—2009《建筑抗震鉴定标准》等标

准,建立了既有建筑“检测—验算—评定”的框架体系^[17],实现了安全性与抗震鉴定的协调统一^[18]。GB 55021—2021和GB 50023—2009遵循新建建筑的“三水准设防”理念,根据建筑遭遇地震的风险大小与其后续工作年限有关,从后续工作年限内具有相同超越概率的角度,将既有建筑划分为后续工作年限30年、40年和50年三档。根据既有建筑实际状况采用两级鉴定的方式:第一级鉴定以宏观控制和构造鉴定为主进行综合评价,第二级鉴定以抗震验算为主结合构造影响进行综合评价。不同后续使用年限的建筑,第一级鉴定(或抗震措施鉴定)的要求不同,第二级鉴定采用的方法不同,抗震鉴定的流程不同,其达到的设防目标也有所不同^[19]。不管是安全性还是抗震鉴定均需进行大量的现场检测,根据设计规范的计算公式进行验算,可能造成既有建筑鉴定结论与现场结论不符,即使尚好的既有建筑,由于采用“短板控制”的稳健鉴定方法常被判定为“不安全”(笔者长期从事既有建筑检测鉴定工作,类似情况时有遇见,如使用良好建筑按照规范荷载取值,砌体因砂浆强度低,混凝土框架因梁柱箍筋配置稍不满足规范要求,混凝土剪力墙因剪力墙水平或竖向配筋稍不满足规范要求即评定为不安全等)。

美国采用FEMA P-154-2015《建筑物潜在地震

危害快速视觉筛查手册》和 ASCE/SEI 41-23《既有建筑抗震评估与加固标准》,通过“筛查+详细评估”的模式,减少现场复杂检测和后期建模计算,即可得出评估结论,显著节约人力物力。部分既有建筑即使常规方法评估为不安全,通过性能化评估仍可判定符合规范要求,也不需要加固等措施,节约整治的成本往往能达到分析成本的数倍。然而上述模式也存在误判风险,即在筛查阶段将真正需要加固整治的既有建筑评定为合格^[20-21]。

5 美国性能化评估与加固各方态度

性能化评估与加固通过系统性分析与精准干预,是应对复杂建筑需求的有效手段,尤其在新材料应用、既有建筑评估和改造等场景中具有优势。美国 IBC、IEBC 和 ASCE 等规范允许将抗震性能化方法作为传统方法的替代方法,多应用于西海岸地震频繁的旧金山、洛杉矶等经济发达地区的超高层建筑、减隔震及重要公共建筑。美国既有建筑以中低层木结构住宅为主,钢结构多用于标准化商业建筑,混凝土建筑相对较少。常规设计因成本低、标准化程度高成为主流,限制了性能化设计与评估的应用范围。

尽管 ICC 等模式规范规定,建筑官员在善意履行规范或其他相关法律或条例所要求的职责时,可免除因行政行为或疏忽导致的人身或财产损害赔偿赔偿责任,其个人不因此承担民事或刑事责任^[22]。但由于建筑法规的公共安全属性,部分建筑官员在执法时倾向于优先保障安全,更依赖可量化的传统指标,导致其更倾向约束“灵活的”性能化。由于专业能力参差不齐,可能加剧执行中的保守性,部分建筑官员甚至拒绝应用性能化以避免合规风险^[23]。出现理论上支持性能化创新,实践中对性能化持“谨慎”态度,要求充分的工程论证及同业评审,以降低责任风险。美国建筑业主常因成本压力、业务中断风险或对未来政策不确定性的顾虑(如预期强制加固计划),倾向于仅进行最低限度的修复而非全面加固,对于加固成本过高的老旧建筑,业主可能选择拆除而非加固,实践中对性能化也持“谨慎”态度^[24]。

6 结束语

根据理论研究成果及国内外震害经验总结,我国已建立起一套适合自身建筑安全性及抗震性能

的鉴定标准体系,该体系经受住了地震的检验。本文介绍了美国既有建筑标准体系,梳理其在既有建筑抗震鉴定评估的技术方法,阐明其性能化评估的理论内核,分析建筑维护、改造和更新中的技术对策,以期为“一带一路”建设项目提供技术参照,并为既有建筑科学规范管理与城市更新提供思路:1)优化局部鉴定、局部加固、何时触发修复或加固的规定;2)将特定时间节点后或符合现行规范建造的,以及经抗震加固的既有建筑定义为“基准建筑”,简化其评价流程;3)建立类似于 FEMA P-154-2015 和 ASCE/SEI 41-23 的分级筛查机制和快速评估流程,针对不同建筑设置差异化评价标准,减少非必要详细检测鉴定,并加强非结构构件评估与整治;4)参考 JGJ 3-2010《高层建筑混凝土结构技术规程》、GB/T 50011-2010《建筑抗震设计标准》中关于新建建筑性能化设计理念,完善性能化评价方法,并将其作为传统鉴定方法的补充,在保障安全的前提下实现经济效益与社会效益的平衡。

参考文献

- [1] FILIPPIDOU F, JIMÉNEZ-NAVARRO J P. Achieving the cost-effective energy transformation of Europe's buildings[J]. *Energies*, 2019, 12(16): 3069.
- [2] National Institute of Building Science. Moving forward: findings and recommendations from the Consultative Council[R]. Washington, DC: National Institute of Building Sciences, 2018.
- [3] U. S. Energy Information Administration. Residential energy consumption survey data: structural and geographic characteristics [EB/OL]. (2020-03-30)[2025-03-10]. <https://www.eia.gov/consumption/residential/data/2020/#structural>.
- [4] U. S. Energy Information Administration. Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS) 2018: building characteristics summary (Table B1.1) [EB/OL]. (2021-06)[2025-03-10]. https://www.eia.gov/consumption/commercial/data/2018/pdf/CBECS_2018_Building_Characteristics_Flipbook.pdf.
- [5] ZHANG Y, FUNG J F, COOK D, et al. Benefit-cost analysis for earthquake-resilient building design and retrofit: state of the art and future research needs [J]. *Natural Hazards Review*, 2024, 25(3): 03124001.
- [6] United States Geological Survey. New USGS map shows where damaging earthquakes are most likely to occur in the US [EB/OL]. (2024-01-16)[2025-03-10]. <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/new-usgs-map-shows-where-damaging-earthquakes-are-most-likely-occur-us>.
- [7] FEMA. Hazus estimated annualized earthquake losses for the United States: FEMA P-366 [R]. Washington, DC: FEMA, 2023.
- [8] 高迪,程志军,李小阳. 美国建筑技术法规简介(上)[J]. 工程

- 建设标准化,2015(6):44-48.
- [9] 张萌,潘华,李金臣. 美国建筑抗震设计的法规体系与设计地震动的确定[J]. 震灾防御技术,2017,12(2):256-267.
- [10] FEMA. Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook [M]. Washington, DC: Government Printing Office, 2017.
- [11] PEKELNICKY R, ENGINEERS S D, POLAND S E C, et al. ASCE 41-13: seismic evaluation and retrofit rehabilitation of existing buildings [C]// Proceedings of the SEAOC. 2012: 1-12.
- [12] 郑士举,蒋利学. 美国既有建筑抗震性能评估标准简介及与我国标准的对比[J]. 建筑结构,2024,54(5):54-61.
- [13] COOK D, SEN A, LIEL A, et al. ASCE/SEI 41 assessment of reinforced concrete buildings: benchmarking nonlinear dynamic procedures with empirical damage observations [J]. Earthquake Spectra, 2023, 39(3): 1721-1754.
- [14] Applied Technology Council. Guidelines for performance-based seismic design of buildings: FEMA P-58 [S]. Washington, DC: FEMA, 2018.
- [15] 罗开海,王亚勇. 中美欧抗震设计规范地震动参数换算关系的研究[J]. 建筑结构,2006,36(8):103-107.
- [16] LEYENDECKER E V, HUNT R J, FRANKEL A D, et al. Development of maximum considered earthquake ground motion maps [J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(1): 21-40.
- [17] 林拥军,肖恬煦,张曾鹏,等. 基于层次分析法-隶属度理论的混凝土框架结构安全性模糊综合评价方法[J]. 工业建筑,2022,52(10):28-38.
- [18] 肖从真,李建辉,马天怡,等. 既有建筑结构加固改造与性能提升现状与发展[J]. 工业建筑,2024,54(1):20-30.
- [19] 程绍革. 建筑抗震鉴定技术标准的历史与发展[J]. 建筑科学,2013,29(11):57-61.
- [20] BEKTAŞ N, KEGYES-BRASSAI O. Conventional RVS methods for seismic risk assessment for estimating the current situation of existing buildings: a state-of-the-art review [J]. Sustainability, 2022, 14(5): 2583.
- [21] AYDOĞDU H H, DEMİR C, KAHRAMAN T, et al. Evaluation of rapid seismic safety assessment methods on a substandard reinforced concrete building stock in Istanbul [J]. Structures, 2023, 56: 104962.
- [22] International Code Council Inc. International existing building code: IEBC-2024 [S]. Country Club Hills, IL: International Code Council Inc., 2024.
- [23] 高迪,程志军,李小阳. 美国建筑技术法规简介(下)[J]. 工程建设标准化,2015(7):49-53.
- [24] GRANT A, ATKINSON C L. Residential wind loss mitigation case study: an analysis of insurance claim data for hurricane michael [J]. climate, 2023, 11(12): 237.