

张萌, 潘华, 李金臣, 2017. 美国建筑抗震设计的法规体系与设计地震动的确定. 震灾防御技术, 12 (2): 306—318.
doi: 10.11899/zzyfy20170207

美国建筑抗震设计的法规体系 与设计地震动的确定

张 萌 潘 华 李金臣

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要 本文论述了美国建筑抗震设计法规体系发展演变过程及其代表性的规范、标准与技术文档; 分析了美国当前建筑法规中设计地震动参数的重要技术见解, 设计地震动的不同层次与作用, 基于目标风险的最大考虑地震概念等技术的进展, 同时, 也总结了美国抗震设计相关法规中设计地震动确定的基本规定。本文旨在从美国庞大复杂的建筑设计法规体系中, 梳理出清晰的建筑抗震设计的法规体系脉络与设计地震动的要求, 为我国建筑抗震设计中设计地震动的相关研究提供参照。

关键词: 建筑抗震设计 设计地震动 模式规范 共识标准 NEHRP Provisions ASCE 7 MCER

引言

随着我国经济发展以及国家“一带一路”发展战略的实施, 越来越多的涉外建设工程项目得以开展, 我国的工程抗震设计和地震危险性评价从业人员, 也需要更加深入地了解国外建筑抗震设计法规, 尤其是专业性较强的设计地震动确定的相关内容。美国建筑抗震设计法规, 在技术上有许多创新, 在世界范围内具有引领性, 已被广泛认可与引用。本文专门针对美国建筑抗震设计中设计地震动参数的确定进行了研究与分析, 希望为相关从业人员了解这方面的背景提供帮助, 同时也为我国建筑抗震设防以及地震动区划相关研究提供参照。

1 美国建筑法规体系

因美国实行联邦体制, 故并无全国统一的建筑设计规范, 而由地方政府依据当地的自然环境特点以及重点灾害类型(如地震、飓风、冰冻、洪水等), 选择当地适用的建筑设计规范或标准, 并通过立法程序确定为地方法规, 从而使其具有强制性, 确保当地民众生命财产和工程建筑的安全性。例如, 美国西部地区建筑规范就以抗震设计为重点。美国政府鼓励民间社会力量开展规范与标准的制定, 并通过技术路线的竞争, 争取得到社会的广泛使用, 特别

[收稿日期] 2017-02-21

[作者简介] 张萌, 男, 生于 1991 年。硕士研究生在读。主要从事地震危险性概率分析方面的研究。E-mail: zmgeophysics@163.com

[通讯作者] 潘华, 男, 生于 1966 年。研究员。主要从事地震活动性、地震危险性分析、地震区划方面的研究。E-mail: panhua.mail@163.com

是地方政府的采纳，以确立自身规范的权威性。这一政策，极大地促进了建筑规范和标准的发展，在美国出现了大量专业机构或组织开展规范或标准的研究与制定，也使得各规范与标准对新技术的应用有较大的积极性，但同样也造成美国复杂的多元化规范与标准体系（卫明，2001a，2001b）。经过数十年的发展、竞争与融合，当前美国的建筑规范体系趋于稳定，且在全国形成了相对统一的建筑设计法规体系。

当前，美国建筑设计法规体系大致由“模式规范”（Model Code）、“共识标准”（Consensus Standard）和“源文件”（Resource Document）构成。

1.1 模式规范（Model Code）

美国地方政府需要结合本地区经济与社会发展需要，选用适当的规范纳入地方法规，而专业协会或组织制定的规范，就像是一个个建筑规范的示范，由应用部门或者地方政府进行评估和选择，因此，这类规范形象地称为“模式规范”（Model Code），这是美国规范的特色。

1994 年之前，美国有 3 个组织在制订建筑模式规范，分别是国际建筑官员大会（International Conference of Building Officials，简称 ICBO）制定的 UBC（Uniform Building Code）规范，国际建筑官员与法规管理员联合会（Building Officials Code Administrators International，简称 BOCAI）制订的 NBC（National Building Code）规范，以及美国南方国际建筑法规委员会（Southern Building Code Congress International，简称 SBCCI）制订的 SBC（Standard Building Code）规范。这 3 个模式规范是美国主要的建筑规范，但都存在地域局限性，使得全美缺乏一致性的建筑法规要求，对设计师和承包商而言，多样而复杂的模式规范体系造成使用者了解、掌握与应用规范的较大困扰。

1994 年，上述 3 个模式规范编制机构共同成立了美国国际法规理事会（International Code Council，简称 ICC），由 ICC 开始推动建筑规范的协调和统一，力求改变以往美国国内不同地区采用不同模式规范的局面。ICC 于 1997 年发布了新版规范的草案，经讨论修订，最终于 2000 年正式发布“国际建筑规范”（International Building Code，简称 IBC 规范），与此同时，UBC、NBC、SBC 规范分别在 1997、1999、1999 年推出最终版后不再继续更新，IBC 规范实现了对 3 个模式规范统一。IBC 每隔 3 年更新 1 版，最新版本为 2015 版。IBC 规范现已在美国 50 个州得到应用，大多数美国社区采纳了基于 IBC 的建筑规范，这一局面使得建筑法规的一致性在全美得到根本性的改善（FEMA，2010）。

美国模式建筑规范尚未达成完全的统一，除了 ICC 制定的 IBC 规范外，还有一部由美国国家消防协会（National Fire Protection Association，简称 NFPA）制定的规范。NFPA 最初曾加入 ICC，共同致力于规范统一，后因技术理念上的不一致而退出 ICC，并自行制定建筑模式规范“建筑建造与安全规范”（Building Construction and Safety Code），称为 NFPA 5000 规范，希望与 ICC 的规范竞争。NFPA 5000 在 2003 年正式出版，每隔 3 年更新 1 版，最新版本也为 2015 版。NFPA 5000 已被接受为美国国家标准，其优势在于建筑物的火灾防护，但由于发行时间较短，所以影响力还有限。

1.2 共识标准（Consensus Standard）与源文件（Resource Document）

随着模式建筑规范不断发展，许多建筑相关行业（如混凝土、砌体材料、钢材、木材）的专业协会，针对本行业特定建筑材料的使用和结构体系构建，在设计与施工方面提出大量专业性的技术要求和指南，在达成行业共识被广泛接受以后，行业协会往往按照严格的标准

开发程序,将这些技术要求和指南提升为行业标准的形式颁布,成为“共识标准”(Consensus Standard)。例如,建筑与结构最小设计载荷 ASCE/SEI 7、混凝土建筑要求 ACI 318、钢结构规程 AISC 360 等标准。这些行业共识标准在模式规范中已被大量引用,例如,IBC 或 NFPA 5000 对标准 ASCE/SEI 7 的引用,同时,不同行业共识标准之间也彼此相互引用,例如,标准 ASCE/SEI 7 中对 ACI 318、AISC 360 等标准的引用(FEMA, 2010)。“共识”(Consensus),实际上是指标准形成程序要求的一个寻求所有参与者共识的决策过程,经由该过程后形成的标准,能够得到所有参与者赞成,但这只意味着要听取所有参与者的意见,并不是每个参与者的意见都被采纳(Goupil, 2013)。

由于建筑规范在许多方面还不够成熟,结构设计和建造的理论、技术与方法在不断的探索与发展,同时不断积累的设计与建造经验也在持续为建筑规范的完善提供建议,因此,社会上一些较为权威的专业协会或研究机构常常针对模式规范中的一些专题,开展深入的调查、研究与分析,在实践中探索有关技术的改进、新理论与技术的应用、新材料与结构的使用、新设计方法及其标准化等方面,形成实用性的研究成果或解决方案,并以研究报告或建议书的形式发表,服务于特定标准和模式规范的更新与发展。例如,美国加州结构工程师协会(Structural Engineers Association of California, 简称 SEAOC)发布著名的“蓝皮书”(Blue Book),是早期 UBC 规范更新的重要技术支撑文件;美国应急管理局(Federal Emergency Management Agency, 简称 FEMA)下属建筑地震安全委员会(Building Seismic Safety Council, 简称 BSSC)发布的 NEHRP Provisions,是 ASCE/SEI 7 标准更新的主要技术支撑。同时,为便于标准和规范更新时直接采用,这类报告或建议书常常以标准或规范的格式给出并附有详尽的说明。这类文件是标准或模式规范条文规定的重要来源,称为“源文件”(Resource Document)。

2 美国建筑抗震设计法规体系

美国没有统一的专门性的建筑抗震设计规范,建筑抗震设计的相关规定通常包含在建筑规范中结构设计的相关章节,并与相关行业共识标准和法规源文件一并构成完整的建筑抗震设计法规体系,共同实现建筑抗震设计要求的标准化,同时也保持建筑抗震设计技术与标准的持续进步和发展。当前美国基本形成了由源文件 NEHRP Provisions、共识标准 ASCE 7、模式规范 IBC 和 NFPA 5000 规范、地方法规共同构成的建筑抗震设计法规链。

2.1 早期的建筑抗震设计法规文件

美国的建筑抗震设计是在受地震影响最严重和频繁的美国西部加州地区发展起来的。1927 年,首次发布了包含建筑抗震设计内容的 UBC 规范,但在该规范中抗震设计属于附录中的建议性条款,不具强制性,且早期的 UBC 抗震设计条款也较为简单,例如,地震力直接取重力荷载的 7.5% (软土场地为 10%)。

1957 年,美国加州结构工程师协会(SEAOC)出于统一整个加州的地震设计标准和要求的目的,责成其下属的地震委员会研究加州抗震设计原则、方法与标准,经 2 年的工作,于 1959 年发布了“推荐的侧向力要求及其说明”(Recommended Lateral Force Requirements and Commentary),即著名的“蓝皮书”(Blue Book)。蓝皮书中的抗震设计条款很快被纳入 1961 年版 UBC 规范,且 1961 版 UBC 规范也开始将抗震设计条款正式纳入规范正文,使得建筑抗震设计在美国得以广泛开展。此后,SEAOC 持续跟踪最新抗震研究进展并更新蓝皮书,

同时也被后续各版本 UBC 规范采纳,使得 UBC 的抗震设计条款愈加丰富,成为美国早期抗震设计法规的主要模式规范,蓝皮书也成为 UBC 模式规范更新的重要基础支撑文件(Diebold 等, 2008)。

1973 年, SEAOC 又创建了应用技术委员会(Applied Technology Council, 简称 ATC)以开展抗震设计实践和规范改进与提升的研究,并于 1978 年发布了研究报告 ATC 3-06(ATC, 1978)。该报告中提出了许多开创性的抗震设计概念、程序、方法以及试验性设计,为后来美国建筑抗震设计奠定了基础,对以后美国乃至世界抗震设计理论与实践的发展都有重要影响。ATC 3-06 报告的许多内容为蓝皮书吸收,从而也成为 UBC 规范修订的技术支撑文档。蓝皮书和 ATC3-06 报告对 UBC 的发展有巨大的影响,通过 UBC 的模板作用也影响到早期的荷载标准 ASCE 7 的前身 ANSI A58.1(Beavers, 2002)。

美国早期的抗震设计法规基本上是以 UBC 规范为主,其他规范和标准如 NBC 规范、SBC 规范、ASCE 7 标准等均引用 UBC 规范的相关规定,而蓝皮书、ATC 3-06 文件是 UBC 规范的重要支撑。

2.2 当前建筑抗震设计法规重要的规范与文件

2.2.1 ASCE 7 标准

ASCE 7 标准的前身为美国国家标准协会(American National Standards Institute, ANSI)发布的国家标准 ANSI A58.1。1945 年,ANSI 发布了第一个针对建筑与结构荷载确定的共识标准 ANSI A58.1-45,即“建筑和其他结构的最小设计荷载”(Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures),该标准由美国土木工程师协会(American Society of Civil Engineers, 简称 ASCE)依照 ANSI 的程序和要求开发而成。1982 年前 ANSI A58.1 各版本更新均采纳 UBC 规范关于抗震设计地震荷载的规定,1982 年 ANSI A58.1-82 参照 ACT 3-06 报告对抗震设计要求和抗震设计地震动图进行局部调整,1988 年起该标准更改为 ASCE 7 标准系列,延续了 1982 年版本的抗震设计要求。1993 年起,ASCE 7 开始跟随 NEHRP Provisions 更新,但在抗震设计方面,主要是参照 ATC 3-06 的双参数抗震设计地震动图进行调整。由 1998 年 ASCE 7-98 起,随着 1997 版 NEHRP Provisions 的出现和逐渐的成熟,ASCE 7 开始依据最新版本的 NEHRP Provisions 进行更新。2002 年以后,ASCE 7 标准改由 ASCE 所属的结构工程学会(Structural Engineering Institute, SEI)承担开发,正式编号改为 ASCE/SEI 7 标准,但习惯上仍简化表示为 ASCE 7。

2.2.2 NEHRP Provisions

1971 年 San Fernando *M* 6.5 地震使许多采用最新抗震设计规定设计建造的房屋遭到严重破坏,使美国意识到地震问题的严重性,以及现有抗震设计理念和方法存在的缺陷,从而促成“国家地震灾害减轻计划”(National Earthquake Hazard Reduction Program)于 1978 年设立,简称 NEHRP。NEHRP 以减轻地震灾害带来的生命和财产损失为长期目标,支持了许多基础和实际应用方面的研究项目,也获得了大量重要成果,其中就包括美国应急管理局(FEMA)下属的建筑地震安全委员会(BSSC)在 ATC 3-06 报告基础上开发的技术文件“NEHRP 新建建筑与其它结构抗震条款建议”(NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, 简称 NEHRP Provisions)。NEHRP Provisions 的出现,极大地改变了美国建筑模式规范和标准的格局,使得复杂的模式规范和标准体系逐步地走向统一。

NEHRP Provisions 正式颁布于 1985 年,早期为 3 年更新 1 版,因其权威性、先进性以及

广泛的适用性,很快该源文件就被后续更新的一系列模式规范、标准所采纳。1993 NBC、1994 SBC 规范采纳 1991 版 NEHRP Provisions, 2000 年发布 UBC、NBC 和 SBC 这 3 大模式规范统一后的 IBC 规范, 采纳了 1997 版 NEHRP Provisions, 此后 IBC 规范每间隔 3 年均基于最新的 NEHRP Provisions 进行更新。1998 年以后各版 ASCE 7 标准也均基于最新版 NEHRP Provisions 进行更新。2003 年第一版 NFPA 5000 规范发布, 完整采纳了 ASCE 7-02 标准, 实际上源自 2000 版 NEHRP Provisions。

NEHRP Provisions 自 2003 版以后其更新周期为 5 年, 同时, 考虑到与标准更好地衔接, NEHRP Provisions 2009 版开始直接采用 ASCE 7-05 标准的原始条文(包括编号和格式), 并在此基础上直接进行增补、更新和调整, 直接作为下一版 ASCE 7-10 标准的条款供审查(FEMA, 2009), 两者的关系已经你中有我, 我中有你, 密不可分。

2.2.3 IBC 规范和 NFPA5000 规范

建筑模式规范是一部完整的建筑规范, 内容包括建筑设计、建造的诸多方面, 以 2012 年版 IBC 规范为例, 规范内容涉及管理与实施、建筑使用分类与特殊措施、结构分类、火与烟雾防护、内装修、消防系统、疏散措施、无障碍设施、照明通风等室内环境、节能和生命安全设施, 结构设计、结构试验与检测、土层与地基、各类建筑材料使用、电力系统、上下水系统、电梯、建造安全等等(ICC, 2012)。建筑抗震设计的内容主要包含在“结构设计”一章的相关要求中。

模式规范中的结构设计, 技术规定最主要包括设计要求、荷载组合与荷载确定两部分。设计要求主要规定建筑、结构及其部件的设计和建造的控制性原则和要求, 往往在设计计算分析的相关要求中规定对侧向地震力导致结构倒塌破坏的分析要求。规范中的荷载确定部分, 对重要荷载之一的地震荷载(Earthquake Loads)给出了专门的详细规定。例如, IBC 规范在 16 章结构设计中, 专门在 1613 节规定了地震荷载的确定与应用(ICC, 2012); NFPA 5000 规范在 35 章结构设计中, 专门在 35.10 节规定了地震荷载的确定与应用(NFPA, 2009)。

但无论是 IBC 规范还是 NFPA 5000 规范, 其中对地震荷载的规定, 均完全引自美国国家标准 ASCE 7。

3 美国建筑抗震设计中设计地震动的确定

美国建筑设计模式规范中抗震设计采用的设计地震动取值的相关规定均引用 ASCE 7 标准。ASCE 7 当前的最新版本为 2010 年版 ASCE 7-10, 是在 NEHRP Provisions 2009 版基础上编制完成的, 2 个文件中关于设计地震动参数取值的相关规定基本一致。

3.1 NEHRP Provisions 设计地震动的基本理念

通过多年的抗震实践, 地震工程学家们认识到, 建筑的地震安全性除了取决于明确的设计地震动以外, 还取决于一系列其它关键因素的处理, 如结构设计标准、分析和程序、抗震措施、材料以及建造质量等, 各方面的综合影响使实际经抗震设计后的结构在遭遇超过设计水平的地震动作用时, 也不会发生倒塌而导致生命的重大损失, 这种性质称作“抗震裕度”, 其提供了防御超过设计地震动的、发生概率更低的、更大的地震动的能力(FEMA, 1998)。这一理念逐渐被发展中的 NEHRP Provisions 采纳, 使得美国的建筑抗震设计进入了一个新阶段。

以 NEHRP Provisions 1997 版为重要标志, NEHRP Provisions 在设计地震动确定方面出现了几个重要变化: ①设定建筑抗震性能的最高目标, 即最大考虑地震 (Maximum Considered Earthquake, 简称 MCE), 要求建筑遭受不超过 MCE 地震动时应保持较低的倒塌概率, MCE 地震动水平大致相当于 50 年超越概率 2% (约 2500 年一遇); ②明确了设计级地震动与 MCE 地震动的关系与建筑抗震裕度相关, 建筑要达到抗御 MCE 地震动的能力, 需综合抗震设计和其固有的抗震裕度, 设计级地震动的 1.5 倍就是 MCE 地震动; ③采用 MCE 地震动 5% 阻尼加速度反应谱 0.2s 和 1s 周期点谱值编制抗震设计地震动图; ④抗震设计地震动图以地震危险性图为基础编制, 在加州沿岸地区采用确定性方法依活动断层特征地震确定 MCE 地震动, 其他地区采用概率方法依 50 年超越概率 2% 地震动确定 MCE 地震动 (FEMA, 1998)。

NEHRP Provisions 的上述理念, 以及其推荐的结构分析方法, 实际将设计地震动分成了最大考虑地震地震动、设计级地震动、地震反应地震动 3 个目标层次, 分别控制不同的抗震设计目标:

最大考虑地震 (MCE) 地震动是 NEHRP Provisions 中出现的重要概念, 它代表了结构设计中应考虑能够抗御的最高地震动水平。之所以是“考虑”, 而不是“设计”, 是因为该抗震目标的达成, 除了经抗震设计获得的抗御能力外, 建筑结构本身固有的抗震裕度也提供部分抗御这一地震动的能力。MCE 地震动用于控制建筑结构的强非线性变形。

设计级地震动 (Design-Level Seismic Ground Motion) 在 NEHRP Provisions 中用于控制结构弱的非线性位移的允许限值, 用以保证建筑不进入强的非线性变形状态。它是 MCE 地震动的 2/3。

地震反应地震动 (Seismic Response Ground Motion) 在 NEHRP Provisions 中用于控制结构的弹性变形允许值。建筑结构体系的延性、阻尼等性能, 也可以吸收消耗掉一部分地震力, 因此, 真正用于抗震设计结构反应分析计算的地震力, 只取决于结构消耗吸收后剩余的地震力, 相应的地震动是在设计级地震动基础上经耗能折减后得到的, 是造成结构地震反应的地震动。

NEHRP Provisions 的根本目的是防御常规建筑和结构在地震动作用下产生破坏而导致严重的人员伤亡, 满足 NEHRP Provisions 抗震设计规定的建筑结构, 其最高抗震性能能够达到抗御 MCE 地震动作用而不倒塌。NEHRP Provisions 2009 版也具有同样的抗震设防目标, 但其重新定义了抗震设计所考虑的最大地震作用, 提出了基于目标风险的最大考虑地震 (Risk-Targeted MCE, 简称 MCE_R) 概念。MCE 提出并在抗震设计中运用了十多年后, 地震工程学家认识到由于地震危险性曲线斜率的差别, 以及难以避免的一些客观因素 (如材料质量、建造水平等等) 导致建筑倒塌率的不确定性, 全美各地依 MCE 设计的建筑在遭遇到 MCE 级别的地震动作用时, 不能保证建筑倒塌风险是一致的。为此, 提出以 MCE_R 取代 MCE 作为建筑抗震设计最大考虑地震作用。 MCE_R 是满足 50 年倒塌概率 1% 风险目标的最大考虑地震, 它的确定综合了概率地震危险性曲线与地震作用下结构倒塌率的不确定性分布 (Luco 等, 2007)。采用 MCE 地震动进行抗震设计, 能够保证全美范围内经抗震设计后的建筑结构具有抗御同等风险的地震危险性的能力, 但难以保证全美一致的抗倒塌能力, 而采用 MCE_R 地震动进行抗震设计, 目标是保证经抗震设计的建筑能够达到全美一致的倒塌防护水平 (FEMA, 2009), 这是 NEHRP Provisions 2009 版相较于往版本变化较大之处。

3.2 NEHRP Provisions 2009 设计地震动取值的相关规定

(1) NEHRP Provisions 2009 的抗震设计地震动图

美国建筑设计模式规范、共识标准和源文件中的地震动图,可称为抗震设计地震动图(也可称为抗震设计图),是在美国地质调查局(USGS)编制的国家地震危险性图(National Seismic Hazard Maps, 简称 NSHM)基础上编制的(Leyendecker 等, 1995)。抗震设计地震动图往往包含多张图,反映设计相关的地震动参数或关联的系数。

上一版 NEHRP Provisions 2003 中,抗震设计地震动图包含了 MCE 地震动图和长周期段转换周期 TL 图 2 种图件(FEMA, 2004),而 NEHRP Provisions 2009 的抗震设计地震动图相较以往版本变化较大,包括了以下 5 种图件:

① 概率一致地震动(Uniform-Hazard Ground Motion, UHGM)图, UHGM 图为 B 类场地 50 年 2%超越概率 5%阻尼比地震动加速度反应谱 0.2s 和 1s 周期谱值图;

② 风险系数(Risk Coefficients, C_R)图, C_R 图为地震动加速度反应谱 0.2s 和 1s 周期处 C_R 分布图;

③ 确定性地震动(Deterministic Ground Motion, DGM)图, DGM 图为 B 类场地 5%阻尼比确定性地震动加速度反应谱 0.2s 和 1s 周期谱值均值图;

④ 长周期段起始周期(Long-Period Transition, TL)图, TL 图为加速度反应谱长周期段起始周期 TL 分布图;

⑤ MCE 几何平均峰值加速度 PGA 图(MCE geometric mean PGA, MCEG), B 类场地 MCEG 分布图。

这套图中,风险系数是 NEHRP Provisions 2009 中新定义的概念, C_R 定义为概率方法计算得到的基于目标风险的地震动(Risk-Targeted Ground Motion, 简称 RTGM)与概率一致地震动 UHGM 之比,即 $C_R = RTGM/UHGM$ (FEMA, 2009)。

(2) NEHRP Provisions 2009 中规定的 MCE_R 地震动参数的确定

NEHRP Provisions 2009 中 MCE_R 地震动参数,包括地震动加速度反应谱短周期段谱值 S_S 、1s 周期谱值 S_1 ,这一表示与以往版本 MCE 地震动参数的表示是一致的,但内涵有差别。

MCE_R 地震动参数确定步骤如下(FEMA, 2009):

① 读取抗震设计地震动图参数

分别依据 UHGM 图确定 B 类场地 50 年 2%超越概率 5%阻尼比地震动加速度反应谱 0.2s 和 1s 周期谱值,作为 UHGM 地震动加速度反应谱短周期段谱值 S_{SUH} 和 1s 周期谱值 S_{1UH} 。分别依据 C_R 图确定地震动加速度反应谱 0.2s 和 1s 周期的 C_R 值,作为地震动加速度反应谱短周期段谱风险系数值 C_{RS} 和 1s 周期风险系数值 C_{R1} 。分别依据 DGM 图确定 B 类场地 5%阻尼比确定性地震动加速度反应谱 0.2s 和 1s 周期谱值,作为 DGM 地震动加速度反应谱短周期段谱值 S_{SD} 和 1s 周期谱值 S_{1D} 。

② 确定标准场地 MCE_R 地震动参数

标准场地是指 NEHRP Provisions 中抗震设计地震动图采用的 B 类场。

概率方法目标风险地震动加速度反应谱短周期段谱值为 $C_{RS} \cdot S_{SUH}$,确定性方法地震动加速度反应谱短周期段谱值为 S_{SD} ,取两者中的小值,作为标准 MCE_R 地震动加速度反应谱短周期段谱值 S_S 。

概率方法目标风险地震动加速度反应谱 1s 周期谱值为 $C_{R1} \cdot S_{1UH}$,确定性方法地震动加速

度反应谱 1s 周期谱值为 S_{1D} ，取两者中的小值，作为标准 MCE_R 地震动加速度反应谱 1s 周期谱值 S_1 。

③确定场地 MCE_R 地震动参数

依照场地类别确定场地调整系数（表 1，表 2），按式（1）和式（2），确定场地 MCE_R 地震动加速度反应谱短周期段谱值 S_{MS} 和 1s 周期谱值 S_{M1} ：

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2)$$

表 1 场地调整系数 F_a (FEMA, 2009)

Table 1 Site coefficient, F_a (FEMA, 2009)

场地类别	短周期段加速度反应谱值参数				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	开展场地反应分析确定				

表 2 场地调整系数 F_v (FEMA, 2009)

Table 2 Site coefficient, F_v (FEMA, 2009)

场地类别	1s 周期加速度反应谱值参数				
	$S_1 \leq 0.25$	$S_1 = 0.5$	$S_1 = 0.75$	$S_1 = 1.0$	$S_1 \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	开展场地反应分析确定				

(3) NEHRP Provisions 2009 中规定的设计级地震动反应谱的确定

在 NEHRP Provisions 1997—2003 各个版本中，基于抗震裕度的研究结论，将设计级地震动均规定为 MCE 地震动的 2/3 (FEMA, 1998)。NEHRP Provisions 2009 版中以 MCE_R 地震动取代了 MCE 地震动，设计级地震动取为 MCE_R 地震动的 2/3。

①确定设计级地震动加速度反应谱参数

场地设计级地震动加速度反应谱短周期段谱值 S_{DS} 和 1s 周期谱值 S_{D1} 可根据式（3）和式（4）确定：

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (4)$$

②确定设计级地震动加速度反应谱 S_a

NEHRP Provisions 2009 版建议的标准设计谱为图 1 所示的 4 段式加速度反应谱曲线, 各段表达式如下:

$$S_a = S_{DS} \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right), \quad T < T_0 \quad (5)$$

$$S_a = S_{DS}, \quad T_0 \leq T \leq T_s \quad (6)$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T}, \quad T_s \leq T \leq T_L \quad (7)$$

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2}, \quad T_L < T \quad (8)$$

式中, $T_0 = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$, $T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$, T_L 可由抗震设计地震动图中的 T_L 图读取。

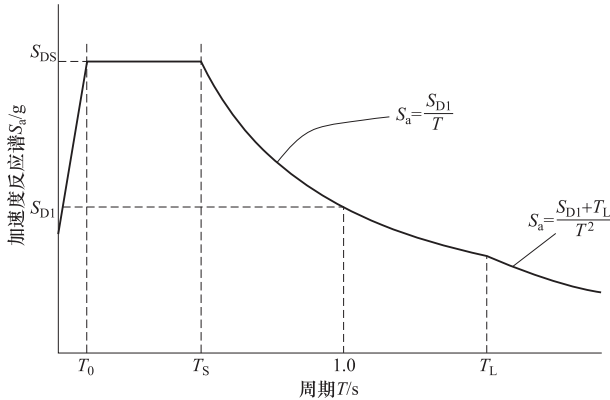


图 1 NEHRP Provisions 2009 设计反应谱 (FEMA, 2009)

Fig. 1 Design response spectrum of NEHRP Provisions 2009 (FEMA, 2009)

(4) 地震反应地震动的确定

抗震设计需要通过结构分析计算来确定建筑抗地震力系统抗御给定的输入地震动需要结构达到的强度、刚度、能量耗散能力等物理指标。NEHRP Provisions 2003 中规定了允许采用的结构分析方法包括等效侧向力分析 (Equivalent Lateral Force Analysis)、模态反应谱分析 (Modal Response Spectrum Analysis) 和地震反应时程分析 (Seismic Response History Procedures), ASCE 7-05 标准采纳了同样的规定 (ASCE, 2006), NEHRP Provisions 2009 中没有相关的内容, 表明在 ASCE 7-10 中延续 ASCE 7-05 版同样的规定 (ASCE, 2010)。

这 3 种结构分析方法在实施中都涉及计算输入地震动的确定, 这一地震动是结构必须依赖其自身的强度、刚度和耗能能力来实际对抗的, ASCE 7 和 NEHRP Provisions 中并未给出一个明确的称谓, 本文考虑该地震动是用于结构地震反应分析的输入地震动, 因此, 将其称为“地震反应地震动” (Seismic Response Ground Motion), 简化表示为 S_G , 其反应谱标定方法可表示如下 (FEMA, 2004; ASCE, 2006, 2010):

$$S_c = \frac{S_a}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (9)$$

式中, R 为反应调整系数 (ASCE 7-10 中 R 值为 1—8), 反映设计采用的抗震结构体系固有的耗能特性, 一般越柔性的结构 R 越大, 其作用相当于对设计级地震动 S_a 的折减; I_e 为地震重要性因子 (ASCE 7-10 中 I_e 值为 1—1.5), 建筑越重要且地震破坏的危害越大, 其地震重要性因子也越大, 其作用相当于对 S_a 的放大。理论上, S_c 不一定比 S_a 小。

等效侧向力分析 (Equivalent Lateral Force Analysis) 中, 取 S_c 的地震动短周期段谱值 (0.2s) 来确定地震基底剪力, 称为地震反应系数 (Seismic Response Coefficient) C_S (FEMA, 2004; ASCE, 2006, 2010)。

(5) NEHRP Provisions 2009 中场址相关的 MCE_R 地震动计算方法

NEHRP Provisions 2009 中, 还规定了针对特定场址进行 MCE_R 地震动参数计算的方法, 步骤为 (FEMA, 2009):

① 概率方法计算基于目标风险的地震动反应谱

概率方法估计规定了 2 个方法: 方法一是进行场址概率地震危险性分析获得 50 年 2% 超越概率 5% 阻尼比地震动反应谱, 再查阅抗震设计地震动图中的 C_R 图, 获得不同周期点 C_R 值, 计算得到场址基于目标风险的地震动反应谱; 方法二是对概率地震危险性分析得到的场址相关的概率地震危险性曲线与一个满足均值倒塌率 10%、方差 0.8 的对数正态分布的倒塌率概率密度函数进行积分, 得到场址相关的地震动倒塌风险性曲线, 设定 50 年倒塌概率 1% 为目标风险, 计算得到场址基于目标风险的地震动反应谱 (Luco 等, 2007)。

② 确定性方法计算基于目标风险的地震动反应谱

确定性方法由活动断裂特征地震震级直接计算场址 5% 阻尼比地震动反应谱, 并以 84% 分位数地震动估计值 (大致为均值的 1.8 倍) 乘以方向系数 (加速度反应谱 0.2s 和 1s 周期方向系数分别为 1.1 和 1.3), 得到场址基于目标风险的地震动反应谱。

③ 确定场址相关的 MCE_R 地震动反应谱

在地震动加速度反应谱的每个周期点上, 取概率方法计算得到的基于目标风险的地震动反应谱值与确定性方法计算得到的基于目标风险的地震动反应谱值中的小值, 得到场址相关的 MCE_R 地震动反应谱。

3.3 ASCE 7-10 中设计地震动取值的相关规定

ASCE 7-10 标准提供了符合美国建筑规范规定的建筑和其它结构设计的最小荷载规定、强度设计和允许应力设计的荷载与荷载组合。ASCE 7-10 标准共列 31 章、4 个附录, 地震与风荷载及相关设计规定是主要内容 (11 章至 23 章、附录 11A 和 11B), 给出了有关地震荷载与抗震设计的详细规定, 涉及抗震设计准则、设计地震动参数确定、重要性因子和风险级别、抗震设计分类、建筑结构抗震设计要求、材料相关的抗震设计与构造措施要求、非结构构件与构筑物抗震设计要求和结构地震反应时程分析等内容。标准中的第 11 章规定了依据抗震设计地震动图确定场地设计地震动参数的方法, 第 21 章规定了依据场址地震危险性和工程地质条件确定场址相关设计地震动参数的方法, 第 22 章给出了标准中采用的抗震设计地震动图, 这 3 章是 ASCE 7-10 标准中涉及设计地震动参数取值的主要条文 (ASCE, 2010)。

由于 NEHRP Provisions 2009 的编排完全是针对 ASCE 7-10 更新的, 因此, ASCE 7-10 版地震荷载与地震反应分析相关规定相对 ASCE 7-05 版的变化之处, 基本上采纳了 NEHRP Provisions 2009 版的相关内容, 但是对抗震设计地震动图做了调整, 将 NEHRP Provisions 2009 版中的概率一致地震动图 (UHGM) 和确定性地震动图 (DGM) 合并, 直接给出基于风险目标的最大考虑地震 (MCE_R) 地震动图, 因此, ASCE 7-10 采用的抗震设计地震动图包括了:

(1) 基于风险目标的最大考虑地震 (MCE_R) 地震动图, 该图为 B 类场地 MCE_R 地震动加速度反应谱 (5% 阻尼比) 0.2s 周期谱值 S_5 和 1s 周期谱值 S_1 分布图;

(2) 风险系数 (Risk Coefficients, C_R) 图, 该图为地震动加速度反应谱 0.2s 周期风险系数 C_{RS} 和 1s 周期风险系数 C_{RI} 分布图;

(3) 长周期段起始周期 (Long-Period Transition, T_L) 图, 该图为地震动加速度反应谱长周期段起始周期 T_L 分布图;

(4) 最大考虑地震峰值加速度 PGA 几何值 (MCE Geometric Mean PGA, MCEG) 图, 该图为 B 类场地 MCEG 分布图。

由于 ASCE 7-10 可以直接读取 MCE_R 地震动值, 因此, ASCE 7-10 标准规定的抗震设计地震动参数取值比 NEHRP Provisions 2009 更加简略, 直接读取标准场地 (B 类场地) MCE_R 地震动参数, 然后完成场地设计地震动参数的确定 (参见本文 3.2 节 (2)、(3)、(4))。场址相关 MCE_R 地震动参数的确定与 NEHRP Provisions 2009 版规定一致 (参见本文 3.2 节 (5))。

4 总结

当前美国建筑设计法规由地方法律、“模式规范” (Model Code)、“共识标准” (Consensus Standard) 和“源文件” (Resource Document) 构成了稳定又充满活力的体系结构, 既保证建筑设计与方法的标准规范化和全国范围内建筑的安全性, 同时, 也能够保持标准的不断进化与发展, 新技术与新方法的不断涌现与应用, 在稳定与发展之间保持了非常好的平衡。

具体到建筑抗震设计法规, 美国也基本上形成了 NEHRP Provisions → ASCE 7 → IBC 和 NPFA 5000 规范 → 地方法规的建筑抗震设计法规链。其中 NEHRP Provisions 具有重要的基础地位, 新的改进首先体现在 NEHRP Provisions 中。ASCE 7 标准是中间关键环节, 它通过国家标准严格的标准审查程序, 检验和审查新的技术和方法改进, 并决定是否真正纳入标准。模式规范是一个门户, 引导建筑抗震设计的专业人员正确地引用技术标准和理解规范要求。地方法规立法, 确保了抗震设计技术标准与规范的落实与强制性实施。美国虽然没有统一的建筑抗震设计规范, 但建筑的抗震设计法规条款实际上已经在 NEHRP Provisions 基础上得到统一。

美国建筑抗震设计在设计地震动方面最新的进展, 是将建筑抗震设防的最高目标由最大考虑地震 MCE, 调整为基于目标风险的最大考虑地震 MCE_R , 反映出抗震设计的目标由保证全美范围内经抗震设计后的建筑结构具有抗御同等风险地震危险性的能力, 调整为具有一致的倒塌防护水平。

美国建筑抗震设计法规中的各级别设计地震动参数均由最高级别 MCE_R 地震动控制, 从方法上能够很好地保证终极倒塌防护设计目标的实现。

FEMA 最新发布的 NEHRP Provisions 2015 版, 针对 ASCE 7-10 标准的相关章节条文进行调整、修改和补充, 将作为新的 ASCE 7-16 的源文件。相较 NEHRP Provisions 2009 版,

NEHRP Provisions 2015 版在确定设计地震动参数方面,基本是继承和延续,仅在抗震设计地震动图的内容方面采纳了 ASCE 7-10 做法,删除了概率一致地震动图(UHGM)和确定性地震动图(DGM),而直接给出基于目标风险的最大考虑地震 MCE_R 地震动图(FEMA, 2015)。NEHRP Provisions 2009 版带来的设计地震动参数方面的变化,将在抗震设计上维持 10 年以上的的时间,以期待出现新的、安全性和应用性上更加理想的设计地震动概念,FEMA 当前正在积极开展针对下一版 NEHRP Provisions 2020 版更新的技术研究,预计在设计地震动参数方面会带来新的发展与变化。

参考文献

- 卫明, 2001a. 美国的建筑标准与规范(上). 建筑, (9): 43—44.
- 卫明, 2001b. 美国的建筑标准与规范(下). 建筑, (10): 43—45.
- ASCE, 2006. Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-05. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- ASCE, 2010. Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-10. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- ATC, 1978. Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings, ATC Publication ATC3-06, NBS Special Publication 510, NSF Publication 78-8. Washington, DC: Applied Technology Council, U.S. Government Printing Office.
- Beavers J. E., 2002. A review of seismic hazard description in US design codes and procedures. Progress in Structural Engineering and Materials, 4(1): 46—63.
- Diebold J., Moore K., Hale T., et al., 2008. SEAOC blue book: seismic design recommendations 1959 to 2008. In: The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China: Seismological Society of China.
- FEMA, 1998. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, part 1: provisions. FEMA 302/1997 Edition. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council.
- FEMA, 2004. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, part 1: provisions. FEMA P-450-1/2003 Edition. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council.
- FEMA, 2009. NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures. FEMA P-750/2009 Edition. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council.
- FEMA, 2010. Earthquake-resistant design concepts: an introduction to the NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures. FEMA P-749. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council.
- FEMA, 2015. NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures, volume I: part 1: provisions, part 2: commentary. FEMA P-1050-1/2015 Edition. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council.
- Goupil J., 2013. ASCE 7 and the standards development process. Structure Magazine, 41.
- ICC, 2012. 2012 international building code. 4051 West Flossmoor Road, Country Club Hills, IL: International Code Council, Inc.

- Leyendecker E. V., Perkins D. M., Algermissen S. T., et al., 1995. USGS spectral response maps and their relationship with seismic design forces in building codes, USGS Open-File Report 95-596. U.S. Geological Survey.
- Luco N., Ellingwood B. R., Hamburger R. O., et al., 2007. Risk-targeted versus current seismic design maps for the conterminous United States. In: Proceedings of the SEAOC 76th Annual Convention. Sacramento, California: Structural Engineers Association of California.
- NFPA, 2009. NFPA 5000: building construction and safety code. Quincy, MA: NFPA, 1 Batterymarch Park.

Building Anti-seismic Design Regulations in the United States and Its Approach to Ground Motion Design

Zhang Meng, Pan Hua and Li Jinchun

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract In this paper, we introduced the evaluation of building seismic design regulation, and some typical codes, standards and documents of the United States. We also discussed and analyzed the new insights into design ground motion parameters, different levels design ground motion connected with difference design performance, the concept of Risk-targeted Maximum Consider Earthquake, and all that technical developments in the US building codes and standards. Then, the provisions about seismic design ground motion are summarized. The purpose of this paper is clearly to reveal the relation of regulatory requirements on building seismic design in the United States from complex system including building codes, consensus standards and the usage of seismic design ground motion. The research work in this paper will be helpful for the seismic design ground motion in China.

Key words: Building seismic design; Seismic design ground motion; Model code; Consensus standard; NEHRP Provisions; ASCE 7; MCE_R