

Requirements and Guidelines for the Seismic Design and Review of New Tall Buildings using Non-Prescriptive Seismic-design Procedures

Structural Engineers Association of Northern California, 2007

Joe Maffei, S.E., Ph.D. (Chair)

Michael Gemmill, S.E.

Ronald Hamburger, S.E.

Neville Mathias, S.E.

Jack Moehle, P.E., Ph.D.

Mark Moore, S.E. (Chair, SEAONC Seismology)

Jeffrey Taner, S.E. (Chair, SEAONC Professional Practices)

Marko Schotanus, Ph.D. (Chair's Assistant, non-voting)



REVIEWED FOR
City of San Francisco Department of Building Inspection

REVIEWED BY
Structural Engineers Association of Northern California (SEAONC)
AS-082 Tall Buildings Task Group

Joe Maffei, S.E., Ph.D. (Chair)
Michael Gemmill, S.E.
Ronald Hamburger, S.E.
Neville Mathias, S.E.
Jack Moehle, P.E., Ph.D.
Mark Moore, S.E. (Chair, SEAONC Seismology)
Jeffrey Taner, S.E. (Chair, SEAONC Professional Practices)
Marko Schotanus, Ph.D. (Chair's Assistant, non-voting)

APPROVED BY
SEAONC Board of Directors
Doug Hobbach, S.E. (President)
William Andrews, S.E.
Grace Kang, S.E.
Peter Lee, S.E.
Reel Lizundia, S.E.
Andrew Alvarado, S.E.
Gary Modrak, S.E.
David Murphy, S.E.
Peter Ferrelli, S.E.

1.应用范围

规范包括抗震设计要求、专家抗震审查以及抗震设计可行性提交要求三方面内容,适用于旧金山市采用非条文性规范的抗震设计方法进行结构抗震设计的新建高层建筑。

注释: 规范特地采用强制性要求和引导性做法两种陈述方式。

规范适用于 2001 年颁布的《旧金山建筑规范》。在 2008 年,旧金山市计划在 2006 年颁布的《国际建筑规范》基础上通过一套新规范。此时,基于新规范的一些特殊要求的适用性,尤其是像最小基底剪力以及建筑质量保证计划等问题都应反复核查。

规范只适用于旧金山市,若要用于其它地区需经过合理的修正,如考虑当地地震危险因素(包括近场效应)、不同建筑规范以及不同工程经验的影响。

规范只适用于采用非条文性规范的抗震设计方法设计的高层建筑。对于其他的建筑形式或者指令性建筑设计要求,建筑主管应请求专家进行抗震审查,规范的一些建议要求可能也是适用的。对专家抗震审查委员会的其它建议由美国加州结构工程师协会(1999b)提供。

规范并非包含所有的高层抗震必备要求。

规范的目的:非条文性规范的抗震设计方法通过援引允许替代性(即,非条文性的)抗震设计程序的《旧金山建筑规范》中的 104.2.8, 1605.2, 和(或)1629.1 部分,对《旧金山建筑规范》中的抗震设计规定性要求提出一至多条替代的非条文规定。

规范的目的:高层建筑是指 h_n 超出临近地面平均高度多于 160 英尺的建筑。

高度 h_n 在《旧金山建筑规范》中被定义为基础上 n 层的高度, 其中 n 可以取为结构的屋顶, 不包括阁楼和其它一些超出屋顶但体量与屋顶相比很小的突出部分。基础可以取为临近结构的地面平均高度。

在此没有提到的规定, 只要建筑主管同意也是可以接受的。

注释: 《旧金山建筑规范》允许非条文性的抗震设计方法部分如下:

104.2.8 可替代材料, 可替代的设计和施工方法。 规范的此条款并非为了禁止在规范中没有明确规定、可替代品及其使用也未被建筑主管部门所批准的材料和可替代的设计和施工方法。

建筑主管部门可能批准任何可替代品, 只要建筑主管部门认为此设计令人满意且符合规范的相关规定, 材料、施工方法等能够符合规范规定, 满足其在强度、防火、安全、有

效性、耐久性以及环境卫生方面的要求, 达到预定的目的。

使用替代品需向建筑主管部门提交相应的有效证明。可替代品批准使用的任何细节都将被记录并保存在规范的实施条例文件中。

1065.2 合理性。 任何要使用的施工系统或方法都必须基于合理的分析基础之上, 与已经建立完善的技术原则保持良好的一致性。这种分析会生成一个完整的传力路径将所有的荷载从它们的作用点传到承受荷载单元的方法。

1629.10.1 (替代程序)一般规定。 在建立完善的技术原则基础上进行合理分析后, 可供选择的侧向荷载[即, 抗震设计]程序可能会用于代替规范中的相关规定。

2. 专家抗震审查委员会

每个工程项目都应成立专家抗震审查委员会。专家抗震审查委员会根据规范要求对建筑结构与抗震性能方面提供独立客观的技术性审查, 并通知建筑主管此设计是否符合规范第一部分所引用的《旧金山建筑规范》规定的要求。

专家抗震审查委员会的成立并非为了代替工程师完成建筑结构的安全质量保证。结构的设计任务仍由工程师独立完成, 保证结构设计符合规范所引用的《旧金山建筑规范》规定要求的责任同样由工程师承担, 管理建筑设计检查审核的任务则由建筑主管部门和设计检查评审顾问们来完成。

专家抗震审查委员会委员的资格认证和选择

除非另外由建筑主管部门来决定, 专家抗震审查委员会应包括至少三名在相关领域公认的专家, 包括结构工程、地震工程研究、基于性能的地震工程、非线性

性时程分析、高层建筑设计、地震地面工程、岩土工程、地质工程以及其它与工程构成相关的领域。

建筑主管部门通过审查其资质与所建工程的要求是否一致来挑选专家抗震审查委员会的成员，建筑主管部门可能会听取部分业主和工程师的建议，但还是由他们自己来做最终的决定。专家抗震审查委员会的成员不应与项目利益产生冲突，也不应是工程设计团队的一员，应在建筑主管部门的指挥下参与审查并提供专业意见。

专家审查范围

建筑主管部门负责界定专家抗震审查委员会的工作范围，因此，无论单独或是作为一个团队，专家抗震审查委员会都应在工程审查合同中写明工作范围，审查的内容应包括：地震危险性分析、地震动参数分析、抗震设计方法、抗震设计性能指标、目标判别标准、数学建模、抗震设计与分析、设计图纸以及计算书。

专家抗震审查委员会应在设计初期就开始进行核查设计方案，如果核查时间较晚则可能会扰乱设计安排。在结构设计早期，工程师、建筑检验部门以及专家抗震审查委员会应共同商讨决定专家抗震审查委员会核查的时间、频率以及在每个阶段工程师应完成的设计进度。

专家抗震审查委员会应向工程师以及建筑主管部门提交书面审查意见，相应地工程师应做出相关回应。专家抗震审查委员会对其提出的意见，工程师的回应以及改进措施做好记录，在工程师以及建筑主管部门需要的时候能够按时提交。在审查完结之时，专家抗震审查委员会需向建筑主管部门提交一份书面报告，报告应包含含有审查范围以及审查意见，并说明其设计是否符合规范的相关规定。建筑主管部门可以在中期审查时期要求专家抗震审查委员会提交中期审查报告。

注释：专家抗震审查委员会所有的报告和文件都不属于施工文件，无论何种情况都不能放入施工图或成为施工合同文件的一部分。施工合同文件所产生的一切责任由工程师承担。

建筑主管部门将会处理工程师与专家抗震审查委员会之间的意见分歧。

工程师会在专家评审之后包括施工过程中，通知建筑主管部门结构设计、构造及材料的显著改变，建筑主管部门有最终决定权，这些改变都会由专家抗震审

查委员会进行核查并由建筑主管部门进行批准。

专家抗震审查委员会委员的报酬由业主提供, 专家抗震审查委员会与业主签订合同, 合同中规定的服务范围或对其进行任何更改都需通过建筑主管部门的批准。

注释: 一些辖区直接与专家抗震审查委员会签订合同并将成本转嫁给业主, 这也是北加州结构工程协会所建议的一种方法。如今对于旧金山市, 想要通过这种方法获得专业服务并不适用, 因此专家抗震审查委员会不再直接与业主签订合同, 即便这样, 专家抗震审查委员依旧会在建筑主管部门的指挥下参与审查并提供专业意见。

3. 抗震设计可行性报告提交要求

项目的抗震设计可行性报告应与《旧金山建筑规范》以及旧金山建筑检验部门的阐释、规定和政策相一致。另外, 与抗震审查有关的文件应该由工程师提交给建筑主管部门以及专家抗震审查委员会。

工程师应尽早向建筑主管部门提交初始的抗震设计可行性报告、结构的描述及初始图纸。结构的抗震设计可行性报告内容应与规范的要求相一致, 并在专家抗震审查过程中不断更新改进所存在的问题。

抗震设计可行性报告应包括所选用的建筑结构体系、分析方法以及验收标准, 并明确与《旧金山建筑规范》规定所不同的模型参数、材料属性、位移限制、构件内力和变形能力。抗震设计可行性报告会包括工程师提出的所有与《旧金山建筑规范》规定不同的地方, 并要经过专家抗震审查委员会的审查和建筑主管部门的批准。工程师最终的抗震设计可行性报告综述应包括在结构图纸的注意事项中。

4. 抗震设计要求

工程师应从地震地面运动角度来评估结构, 下文将详述这一过程。

如果按照 4.3 节的规定预估其在任意大震下非线性响应, 工程师会按照能力设计原则来设计, 使其在侧向非线性变形情况下仍能保持延性屈服机制, 并通过中震作用下的分析来获得屈服所需的强度。工程师会把运用能力设计原则时所需的假设和影响因素都写进抗震设计可行性报告中。

注释: 各个级别地震的评估目的如下:

4.1 节中震作用下的抗震分析明确了《旧金山建筑规范》的要求未提及的一些情况, 并定义了抗震所需的最小强度和刚度要求。最小需求强度由工程师根据《旧金山建筑规范》的最小底部剪力方程及抗震设计系数 R 来确定, 并经过专家抗震审查委员会审核及建筑主管部门的批准。最小需求刚度则是采用有效刚度的假设, 通过满足《旧金山建筑规范》的位移限制要求来确定。相对于条文规定的设计规范, 使用最小需求强度和刚度的非条文抗震设计更有助于结构的抗震性能, 至少也与其持平, 而最大限度地减少规范规定的例外情况也有助于实现这一目标。

如 4.2 节所述, 规范规定, 只有设计结构在小震下的性能可以低于条文规定设计要求的情况下, 小震作用下的抗震分析才是有必要的。

4.3 节所述大震作用下的抗震分析是为了保证在强烈的地震地面运动情况下结构仍保持较低的倒塌率。大震作用抗震分析采用非线性时程分析法来得到结构非线性侧向变形的有效机制, 并获得结构构件仍保持弹性行为的最大荷载。

4.1 中震作用下的结构分析

除了满足工程师在抗震设计可行性报告中特地说明的规范之外的规定, 结构抗震设计必须保证与《旧金山建筑规范》的规定相一致。

注释: 对于中震作用下的结构分析来说, 高烈度地震区高层建筑设计在非条文性规定之外的典型情况就包括超出《旧金山建筑规范》表 16—N 的高度限值, 其它的还包括《旧金山建筑规范》中与 R, ρ, Ω_0 , 以及 T 的限值有关的规定及其它不同的细节要求。工程师需要证明这些例外情形都能达到规范的相关规定。

在计算弹性响应的底部剪力时, 《旧金山建筑规范》中公式 30-6 和 30-7 的下限值应适用于《旧金山建筑规范》1631.5.4 节的缩放过程。 R 的取值应在抗震设计可行性报告中阐明, 且其大小不应超过 8.5。

注释: 对于基本周期 T 超过 2~3 秒的结构, 底部剪力的大小很有可能受公式 30-6 和 30-7 所得的下限控制, 在这种情况下, 抗震设计系数 R 只能通过其在公式 30-7 中的应用影响设计结果。当 R 大于 7 时, 公式 30-7 会受到 30-6 的制约, 在这种情况下, 底部剪力与 R 无关。 R 的大小还与工程场地的地震动参数及场地土的特性有关, 每个项目都需由工程师仔细考虑之后进行分析预估。

工程师应说明采用中震反应谱分析及以下要求时结构能够满足《旧金山建筑规范》中层间位移角的限值:

- a) 计算位移的侧向力不受《旧金山建筑规范》中公式 30-6 和 30-7 的最小底部剪力的控制。
- b) 非预应力混凝土构件的弹性模量取其有效截面的 0.5 倍进行折减。
- c) 应根据抗震设计可行性报告中岩土工程师的建议, 考虑基础刚度的影响。
- d) 应考虑 $P-\Delta$ 效应的影响。

注释: 美国加州结构工程师协会 (2001) 的声明中提到了公式 30-7 应用于核查层间位移角的背景。声明中建议, 相应地美国建筑最小荷载规范 ASCE/SEI 7-05 也要求在计算位移限制时应将《旧金山建筑规范》中公式 30-7 所得的最小外力包含其中。然而, 对于这份由北加州结构工程师协会理事会批准的规范, 加州结构工程师协会的 AB-083 工作组一致认为公式 30-7 没有必要用于核查高层建筑的位移限制, 因为在 4.3 部分大震作用下结构的分析中已经包括了特定场地地震地面运动下的位移核查, 而且这种地震地面运动都需考虑近场效应及方向性效应的影响。该工作组一致认为这样才能更加适当和明确的应用公式 30-7 核查位移限制达到预期目的。

实际上, 混凝土的弹性模量可能与其有效截面的 0.5 倍有明显差距, 这个假设是为了与最小刚度需求保持一致。同时也可以使结构在地震作用下其层间位移可至少与《旧金山建筑规范》相关规定下的预期相近。

4.2 小震作用下正常使用极限状态的结构分析

需要进行小震作用下的结构分析的情况包括如下几种:

- a) 对于非结构构件的设计不符合《旧金山建筑规范》的规定的情况, 工程

师应进行小震作用下非结构构件的分析和评定;

b) 中震作用下结构构件的刚度远小于实际所需的等效线弹性刚度时, 工程师应进行整个结构小震作用下的分析以及小震作用下这些构件的评定;

c) 对于地震动低于《旧金山建筑规范》设计基准地震动(未通过 R 进行折减)而结构仍有不成比例的较大位移和加速度的情况, 工程师应对所有构件进行小震作用下的结构分析。

注释: 由于 4.1 节中震作用下的分析对侧向力水平及位移限制做出了规定, 只有当小震作用下结构响应可能会比中震作用下更差时, 小震作用下正常使用极限状态的结构分析才是必须的, 这包括下面三种情况。

第一种, 当设计不符合中震作用下的非结构要求时。

第二种, 在中震作用下结构分析时, 为降低某些构件的设计承载力将其有效刚度人为地进行降低, 比如混凝土连梁, 这些构件在小震作用下可能更容易受到过度破坏, 必须通过分析进行核查。

第三种情况适用于不同寻常的结构形式, 这种结构能够满足 4.1 节中震作用下侧向力和位移限制要求, 但在较低水平的地震地面运动时却会产生较大的位移或加速度。在本规范中包括这种情况是为了强调所有可能的新的没有包含在《旧金山建筑规范》中的结构形式, 这些结构在小震作用下可能会更容易受到破坏。

在此规范中, 小震作用下的地面运动应当具有 43 年的平均重现期。

在小震作用分析中使用的结构模型应考虑预期地震水平和结构的损伤程度, 合理估计结构的实际刚度和阻尼, 这种评估应能确定预期构件在小震作用下的行为响应。

注释: 要求结构在小震作用下完全保持线弹性并非本规范的目的, 在分析中原始结构的延性构件出现小的屈服也是允许的, 这种结果并不能说明构件中存在较大的永久变形或

需要大修的严重破坏, 分析中混凝土构件出现小的可修复的开裂也是允许的。

对于需要使用数值分析的情况, 分析模型中杆件的行为应与实际期望所一致, 在一些特定情形下, 采用适当的刚度和阻尼以及与小震下的地面运动相一致的线性地震响应谱, 使用线性反应谱法进行分析也是可以的。当采用时程分析法进行分析时, 地震时程记录的选择和修正应满足《旧金山建筑规范》1631.6.1 的要求, 采用小震水平的反应谱而不是设计基本地震反应谱, 采用时程分析中每条记录计算反应的平均值进行设计, 并应采用不少于 7 条经过选择和修正的时程记录。

正如美国北加州结构工程师协会(1999)所言, “以现在的知识能力水平和现有的技术, 准确地预测一个特定建筑的抗震性能是有限的, 中间会有很大的不确定因素。” 建筑的实际抗震性能可能与预期有很大差距。

4.3 大震作用下的结构分析

地震动: 大震作用下的分析应采用《旧金山建筑规范》1655 节所定义的最大设计地震(MCE)。

应选用不少于 7 对水平地震时程记录进行分析, 时程记录的选择和修正应满足《旧金山建筑规范》1631.6.1 的规定及以下要求:

A) MCE 地震反应谱应取代设计基本地震反应谱, 作为地震动时程记录修正的基础。

b) 对地震时程峰值进行校正或对时程反应谱形状进行校正都是可行的。

c) 如有可能, 地震动的时程记录还应考虑近场效应和方向效应的影响, 如速度脉冲在较长时间内增大频谱纵坐标值。

注释: 在这里提到的选择和修正地震时程记录的步骤代表了现在的研究实际情况。在制定这些步骤的时候保留了一定的灵活性, 因此可以根据场地和建筑的特性来确定最佳方案。

基于设计目的对地震时程记录进行选择和修正是当前研究的一个主题, 工程师可能希望考虑新提出的可替代方法, 然而, 这些方法可能并没有在高层建筑上得到充分的测试, 因此他们在采纳这些方法时需要经过谨慎的考虑。特别值得关注的方面还包括许多高层建筑的长振动周期以及多种振动模态对关键响应量的贡献值。

在近场场地, 由于主方向分量中单向破坏性脉冲的存在, 地震主方向分量的平均反应谱通常大于次方向分量的平均反应谱。在所选取的反应谱中包含适当数量的考虑近场效应和方向效应的反应谱以确定设计位移要求是很重要的, 尤其是考虑 4.1 节允许设计过程不

使用公式 30-7 进行位移计算。如果对时程反应谱形状进行了校正, 在地震动部分应单独说明地震主次方向反应谱间的区别。

计算模型: 结构的三维计算模型应符合《旧金山建筑规范》1631.3 节的要求。

分析过程中应考虑所有影响结构在地震中线性和非线性响应的结构和非结构构件的相互作用, 还应包括在中震作用下分析中没有作为抗侧力体系的构件。

注释: 这就要求建立影响建筑动力响应的结构和非结构构件的精细模型。另外, 对于建筑重要部分的响应效果也需要进行评估。

钢筋混凝土结构应考虑开裂等现象对于初始刚度的影响。

注释: 除了开裂, 黏结滑移、屈服强化、剪切开裂后受拉钢化、节点区变形等都会影响钢筋混凝土结构的有效刚度。

埋置在混凝土中的钢构件应考虑其对结构初始刚度的影响, 对于钢框架, 还应考虑嵌板区 (梁柱节点区) 变形的影响。

工程师应对在时程分析中所有可能会发生强度退化的结构构件进行定义, 并应保证在动态分析中考虑这些影响。

注释: 在通常情况下, 构件的强度退化超过峰值的 20%应重点考虑。

在非线性时程分析中应考虑包括所有结构静载在内的 $P-\Delta$ 效应。

提交给抗震审查委员会审查的报告中应明确展示哪些构件为线性模型, 哪些构件为非线性模型。对于取为非线性模型的构件, 审查报告中还应包括相应的实验结果或能证明其能在模型中代表其滞回特性的分析。

分析模型中应考虑地震及预期重力荷载来确定构件特性。在缺少必要信息时, 重力荷载应通过荷载组合 $1.0D + L_{\text{exp}}$ 来确定, 其中 D 为恒载、 L_{exp} 为活载。

注释: 通常情况下, 取 $L_{\text{exp}} = 0.1L$, 其中 L 为规范规定的活荷载, 但不进行荷载折减。

地基强度和刚度对建筑抗震响应的贡献应在模型中进行表示。地基强度和刚度特性应与场地土的性质保持一致, 还应考虑应变率效应以及土壤变形大小的影响。

分析步骤: 进行结构的三维非线性时程(NLRH)分析时, 不需要包含偶然扭转的影响。当地震时程记录中出现主、次方向分量时, 应根据其方向与建筑方向的角度将其应用到三维分析模型中。当地震时程记录为随机取向时, 可随机选择一个角度应用到模型中; 单独的时程记录不需要在多个不同方向上进行分析。

注释: 三维分析需能代表建筑物在地震地面震动中的固有扭转响应, 这可以通过在三维非线性时程分析模型中包含建筑物实际的质量、刚度和强度的位置及分布来实现。在三维非线性时程分析中不需要包含偶然扭转的影响。(4.1 节中震水平下的分析中有偶然扭转的要求。)

工程师应在报告中说明如何在非线性时程分析中考虑阻尼的影响的。除非得到工程师的充分证实, 否则等效粘滞阻尼水平不应超过 5%。

注释: 在分析中阻尼的影响依赖于采用的阻尼模型的类型。一些模型可能在高阶振型下阻尼过度或产生其它的不利影响。

对每一对水平地震时程记录, 结构应按以下荷载组合进行计算:

$$1.0D + L_{\text{exp}} + 1.0E$$

如果需使用其它荷载组合, 需经过工程师的充分证实。

延性需求不应小于非线性时程分析模型计算所得的平均值, 有限延性结构的需求(如柱的轴压和抗剪响应、墙的抗剪响应)还应考虑分析模型计算所得值的分布。

注释: 通常情况下, 有限延性结构的需求可取为模型计算所得平均值加上标准差。选择和修正地震时程记录的步骤以及确定有限延性结构的需求都应在审议进程的早期确定并一致通过。

验收标准:

抗侧力和重力荷载的所有构件的力与变形要求都应复核以保证他们不会超过构件的力与变形能力。这个要求应用于所有中震分析(4.1节)里作为抗侧力体系的构件以及没有作为抗侧力体系但视为对结构有显著影响的构件。

注释: 在中震分析中未作为抗侧力体系的构件, 由于他们与抗侧力体系间的相互作用可能也会遭受较大的变形和荷载, 包括通过多层叠加的轴向力。非结构构件如骨架外墙也应按照规范要求进行检查。本规范在大震水平下不要求进行非结构构件的核查。

工程师应确认设计为非线性地震响应的结构构件和行为, 所有的其他构件和行为也应经过分析论证保持必要的弹性。

注释: 当外力需求小于设计强度时可能会假设构件发生必要的弹性响应, 设计强度定义为标准强度乘以强度折减系数, 其中标准强度基于预期材料特性进行计算, 有限延性结构的强度折减系数按《旧金山建筑规范》的要求进行折减, 延性结构的强度折减系数取为 $\phi = 1.0$ 。若想通过其它方法论证必要的弹性响应也是可行的, 但需通过工程师的证明。

对于允许进入非线性状态的结构构件, 工程师应说明单独构件及构件间的作用下都能满足变形要求, 其承载力和变形能力也应基于相关规范文件或具有代表性的实验结果, 或者通过预期材料特性分析得到证实。

根据非线性时程分析各时程记录计算结果的平均值所得的最大层间位移角不应超过 0.03。

所有的设计取值和步骤都应记录在抗震设计可行性报告中, 并且应通过抗震审查委员会的审核以及建筑主管部门的批准。

书面翻译对应的原文索引

- [1] Requirements and Guidelines for the Seismic Design and Review of New Tall Buildings using Non-Prescriptive Seismic-design Procedures (S). Structural Engineers Association of Northern California, 2007