

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250430066

基于直接法的RC框架结构弹塑性楼层反应谱研究*

张令心, 张禄峰, 马加路, 陈永盛

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 楼层反应谱是非结构部件抗震设计的关键, 一般可以通过时程分析法或者直接法获得。由于时程分析法耗时较长, 难以满足工程初步设计阶段对效率的要求。目前常用的直接法在计算楼层反应谱时仅能考虑弹性阶段, 无法准确地反映实际结构在地震作用下的弹塑性行为。针对上述问题, 以我国量大面广的钢筋混凝土(RC)框架结构为研究对象, 采用三维精细化有限元模型开展弹塑性楼层反应谱分析。依次研究了楼层高度、非结构部件阻尼比和结构延性系数三个关键因素对楼层反应谱结果的影响。在此基础上, 基于Peter Fajar方法开发了一种弹塑性楼层反应谱直接法, 并提出了适用于我国RC框架结构的动力放大系数公式。最后, 通过与3层框架结构时程法楼层反应谱结果进行对比, 验证了本文所提出的方法能够快速且准确地估计我国RC框架结构的楼层反应谱, 从而为非结构部件抗震设计提供了一种高效的简化方法。

关键词: 楼层反应谱; RC框架结构; 直接法; 弹塑性; 非结构部件

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1475-10

Study on Elastoplastic Floor Response Spectrum of RC Frame Structures Based on Direct Method

ZHANG Lingxin, ZHANG Lufeng, MA Jialu, CHEN Yongsheng

(Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080)

Abstract: The floor response spectrum is essential for the seismic design of non-structural components and can generally be obtained through time-history analysis or direct methods. However, time-history analysis is time-consuming and cannot meet the efficiency requirements during the preliminary engineering design phase. The commonly used direct methods can only consider the elastic stage when calculating the floor response spectrum and cannot accurately reflect the actual structure's elastoplastic behavior under seismic action. To address the above issues, widely used reinforced concrete (RC) frame structures in China were selected as the research object, and a three-dimensional refined finite element model was employed to conduct the elastoplastic floor response spectrum analysis. The effects of three key factors—floor height, damping ratio of non-structural components, and structural ductility coefficient—on the floor response spectrum results were investigated sequentially. Additionally, based on the Peter Fajfar method, an elastoplastic floor response spectrum direct method was developed, and a

* 收稿日期:2025-04-30;修回日期:2025-08-05

基金项目:国家自然科学基金(U2139209)、黑龙江省自然科学基金(LH2023E018)、国家重点研发计划(2023YFC3805102)资助

作者简介:张令心(1967—),女,研究员,博士。主要从事工程抗震等研究。E-mail:lingxin_zh@126.com

通信作者:马加路(1984—),男,副研究员,博士。主要从事工程抗震等研究。E-mail:jialuma@163.com

dynamic amplification factor formula applicable to RC frame structures in China was proposed. Finally, by comparing the floor response spectrum obtained by time-history analysis for a three-story frame structure, the proposed method in this study was verified to rapidly and accurately estimate the floor response spectrum of RC frame structures in China, thereby providing an efficient simplified method for the seismic design of non-structural components.

Keywords: floor response spectrum; RC frame structure; direct method; elastoplasticity; non-structural component

0 引言

随着经济飞速发展,非结构部件在建筑总成本中所占比例日益增大,在某些情况下非结构部件成本甚至高达建筑总成本的75%以上^[1]。楼层反应谱(Floor Response Spectrum, FRS)是非结构部件抗震设计的关键。常用的楼层反应谱计算方法主要有直接法和时程分析法。其中,直接法因其简单快捷的特点被广泛应用。1993年Y. Yasui等^[2]运用理论力学原理,提出了一个简洁的直接法构想。国外建筑规范和标准中也参考了直接法,如ASCE/SEI 7-10^[3]和Eurocode8^[4]分别提供了基于建筑物高度的峰值楼板加速度的简化经验公式。然而,这些方法中既没考虑非结构部件的阻尼比,也没有考虑结构的弹塑性行为对FRS的影响。针对上述情况,部分学者提出了各种改进方法。例如,R. Villaverde^[5]提出了一种类似规范流程的简化方法;M. Pinkawa等^[6]对不同规范方法进行了比较和评述;R. A. Medina等^[7]开发了一种更为精细的直接楼层反应谱的方法;P. M. Calvi等^[8]将其之前仅适用于单自由度系统的研究^[9]拓展至多自由度系统,但该方法仍然仅适用于弹性结构;文献[10-14]在此基础上开发了适用于弹塑性结构的方法,但由于数据来自于二维简化模型,精度难以保证。

近年来,国内的非结构部件抗震设计逐渐得到重视。李忠献等^[15]研究了土-结构相互作用对于楼层反应谱的影响;徐熙等^[16]研究了不同持时地震动作用下楼层反应谱的特征;李建波等^[17]研究了地震动不确定性对于楼层反应谱的影响;针对核电结构,刘燕军等^[18]在比较Biggs方法、Kapur方法和Singh方法后,提出了一种适用于结构弹性阶段的修正模态直接法;W. Jiang等^[19]开发的直接方法也仅适用于弹性结构;Q. X. Shang等^[20]基于V. Vukobratović和P. Fajfar方法^[12]提出了一种用于计算楼层反应谱的简化方案,但该方法仍仅适用于弹性多

自由度结构,未能考虑结构弹塑性的影响。

综上所述,直接法虽然能够满足快速计算的要求,但是多数直接法的研究止步于弹性情况,无法准确地反映结构在地震中的复杂弹塑性行为,且无法综合考虑我国与国外规范的差异。因此,研究适用于我国国情且能够考虑结构弹塑性影响的RC框架结构楼层反应谱直接法具有重要意义。为此,本文设计了4层、7层和10层3类典型的RC框架结构;通过时程分析法研究了楼层高度、非结构部件阻尼比和结构延性系数三个重要参数对楼层反应谱结果的影响;借鉴V. Vukobratović等^[12-14]的研究成果,考虑结构弹塑性的影响给出了符合我国RC框架结构特点的弹塑性楼层反应谱直接法,并得到了其动力放大系数公式;在此基础上,进一步考虑了楼层反应谱中不同周期区域响应成分的差异,采用适当的组合方法进行分段处理,从而得到更加符合我国设计规范^[21]的RC框架结构弹塑性楼层反应谱直接法;最后,通过对比一栋3层RC框架结构的时程分析结果,验证了本文所提出方法的有效性,为我国RC框架结构楼层反应谱快速计算提供了一种高效且合理的方法。

1 RC框架结构分析模型

为了研究适合我国规范的RC框架结构弹塑性楼层反应谱直接法,按照我国《建筑抗震设计规范》^[21]设计了三栋8度设防的典型RC框架结构,分析了结构的模态信息,并验证了模型的可靠性,为后续楼层反应谱的参数化研究提供了基础。

1.1 弹塑性有限元模型

选取参考文献[22]中根据中国建筑抗震设计规范要求,按8度设防,设计地震分组一组,场地类别Ⅲ类,设计的4层、7层和10层三栋RC框架结构作为算例。结构的平面布置如图1所示,立面布置如图2所示,柱的具体截面信息及配筋情况见表1,柱的箍筋

统一按照 $\Phi 8@150$, 4 肢计算; 板厚均为 120 mm, 梁均为 300×600 mm, 配筋率取 0.5%。三栋框架底层层高为 4.2 m, 其余层高均为 3.6 m。在框架结构的地震楼层反应谱分析中, 多数研究倾向于运用集中质量-弹簧模型作为简化手段提升计算效率。然而, 该模型存在一定的局限性, 它无法明确考虑梁柱的强度比与刚度比的影响^[23], 可能导致对框架结构地震反应的过高或过低估计。故本研究采用 OpenSees 弹塑性三维精细有限元模型开展研究, 梁柱部件均采用纤维单元, 楼板假设为刚性; 钢筋采用 Steel02 各向同性应变硬化的单轴钢材料; 混凝土本构选取 Concrete01 零抗拉强度模型, 具有退化的线性卸载/重新加载刚度且没有抗拉强度; 截面划分为核心区混凝土和非核心区混凝土纤维, 核心区混凝土箍筋约束作用系数 K 可由式(1)给出:

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f_c} \quad (1)$$

式中, ρ_s 为单位体积混凝土配箍率; f_{yh} 为箍筋屈服强度; f_c 为混凝土抗压强度。

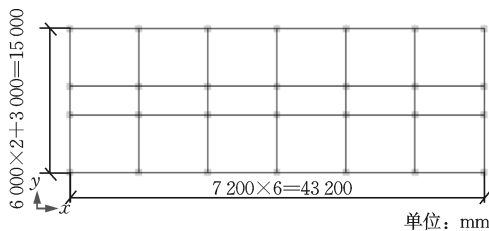


图1 RC框架结构平面

Fig.1 Plan view of RC frame structures

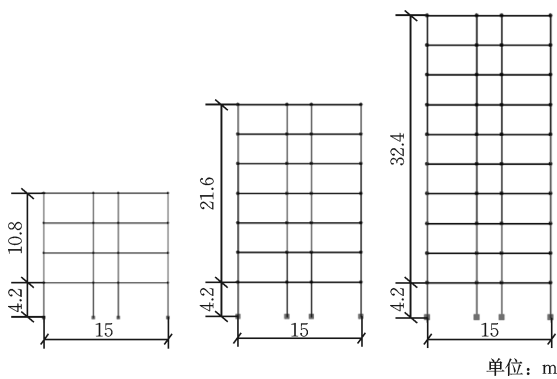


图2 RC框架结构立面

Fig.2 Elevation view of RC frame structures

对结构进行模态分析, 分别得到了三栋框架结构的前三阶周期以及相应的振型参与系数, 见表2。三栋结构基本周期分别为 0.58、1.03、1.52 s, 依据文献[24]分类方法可分别代表 RC 框架结构中的低层短周期, 中高层中周期和高层长周期结构。

表1 RC框架结构柱尺寸信息与配筋情况

Table 1 Dimensions of RC frame structure columns and reinforcement conditions

层数	截面尺寸/ mm	角柱配筋 率/%	边柱配筋 率/%	中柱配筋 率/%	
4层	600×600	1.3	1.1	1.1	
框架	2~4	550×550	1.2	1.2	1.2
7层	1~2	600×600	1.4	1.3	1.3
	3~5	550×550	1.3	1.3	1.3
	6~7	500×500	1.5	1.5	1.5
10层	1~3	800×800	1.3	1.3	1.3
	4~6	700×700	1.3	1.3	1.3
	7~10	600×600	1.5	1.5	1.5

表2 RC框架结构弱轴Y方向前三阶周期及振型参与系数

Table 2 First three periods and modal participation factors in weak-axis Y direction of RC frame structures

模态 阶数	4层框架		7层框架		10层框架	
	周期/s	振型参与系数	周期/s	振型参与系数	周期/s	振型参与系数
1	0.58	0.88	1.03	0.85	1.52	0.81
2	0.18	0.09	0.35	0.10	0.49	0.13
3	0.09	0.02	0.19	0.04	0.27	0.03

1.2 模型验证

为了验证上述所建立的弹塑性有限元模型有效性, 选取陆新征等^[25]给出的框架结构中柱滞回试验和蒋利学等^[26]给出的钢筋混凝土框架推覆试验作为验证对象。将按照本文建立的模型的模拟结果与试验结果进行对比, 如图3和图4所示。从图中可以看出, 本文模拟结果与两个试验的结果基本

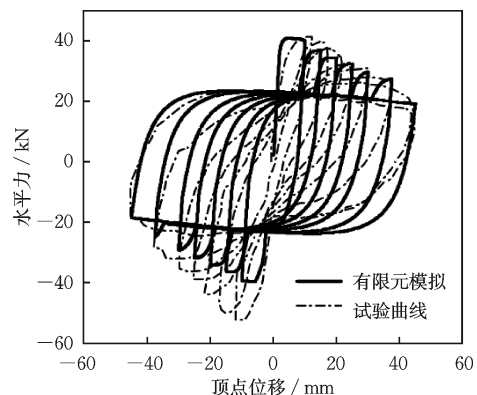


图3 中柱C滞回曲线试验结果与模拟结果对比

Fig.3 Comparison of experimental and simulation results of hysteretic curves for middle column C

吻合,表明本文的弹塑性有限元模型能够准确地描述构件及结构在不同荷载下的响应。因此本文所采用的建模及分析方法有效且可靠。

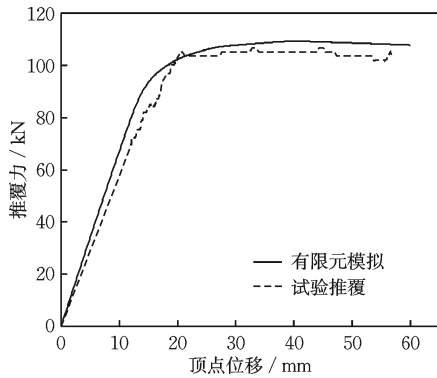


图4 框架推覆试验结果与模拟结果对比

Fig.4 Comparison of pushover experimental and simulation results for frame

1.3 地震动选取

以我国8度设防,设计地震分组一组,场地类别Ⅲ类的设计谱作为目标谱,参考刘恒荣等^[27]从PEER-NGA数据库中选取了20条地震动记录。图5绘制了所选地震动的加速度反应谱及平均反应谱(阻尼比为5%),并与设计反应谱进行了对比。为了充分考虑结构弹塑性对于楼层反应谱的影响,将所选地震动幅值放大1.5倍,PGA在0.1g到0.7g之间,从而确保结构在所有地震动下均进入塑性阶段。

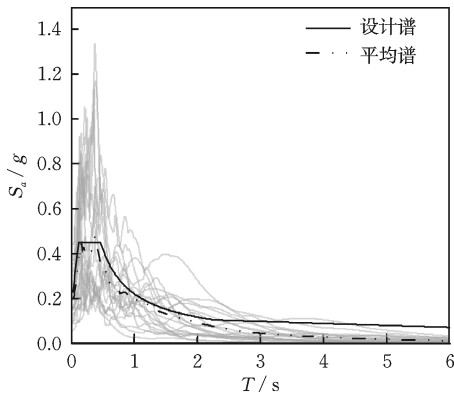


图5 地震动反应谱

Fig.5 Seismic motion response spectra

2 影响楼层反应谱的关键参数分析

采用时程分析方法分别计算上述三栋RC框架结构在20条地震动作用下的动力反应,分别提取结

构各楼层的加速度响应结果,计算获得各楼层高度的楼层反应谱。参考V. Vukobratović等^[12-14]及其他相关研究,得到影响楼层反应谱的三个主要因素(包括楼层高度、非结构部件阻尼比和结构延性系数),并分析了它们对楼层反应谱时程分析结果的影响。

2.1 楼层高度的影响

峰值楼板加速度与峰值地面加速度的比值 PFA/PGA ,在我国规范^[21]中被定义为给定楼层的高度系数(或位置系数),用于表征不同楼层高度对地震响应的放大作用,现行规范公式通常将 PFA 沿高度的变化简化为线性关系。图6为20条地震动时程分析得到的 PFA/PGA 结果及其平均值,结果表明, PFA/PGA 沿高度分布呈现出明显的非线性特性,与P.Fajfar计算结果规律一致。

从平均值可看出,除个别较低楼层外,地震作用对于较高楼层 PFA 均有不同程度的放大作用。此外,对于4层框架结构, PFA/PGA 的最大值位于顶层;而对于7层和10层框架结构,中间楼层放大效应更强,这一现象在个别地震动分析结果中表现得尤为显著。

2.2 非结构部件阻尼比的影响

为了研究非结构部件阻尼比对楼层反应谱的影响,分别计算了非结构部件阻尼比 ξ 为2%、5%、10%和20%时三栋框架顶层楼层反应谱,并经 PGA 归一化,结果如图7所示。

从图7可以看出,随着非结构部件阻尼比的降低,楼层反应谱峰值明显升高,表明非结构部件阻尼比对于楼层反应谱有着重要影响。从图7还可以看出,当非结构部件周期 T_s 较长时, FRS/PGA 的比值随着周期的增加而逐渐减小,并且此时阻尼比的影响也逐渐减小。目前,多数直接法采用直线段来简化楼层反应谱^[8-9],而根据图7时程法的结果可知, FRS 随周期的变化呈曲线形式,因此,采用直线段简化的方法在不同周期段容易导致楼层反应谱值被过高或过低估计的问题。所以,在使用直接法时,建议采用分段处理并尽可能用曲线拟合楼层反应谱。

2.3 结构延性系数的影响

分别对三栋RC框架进行Pushover-N2推覆分

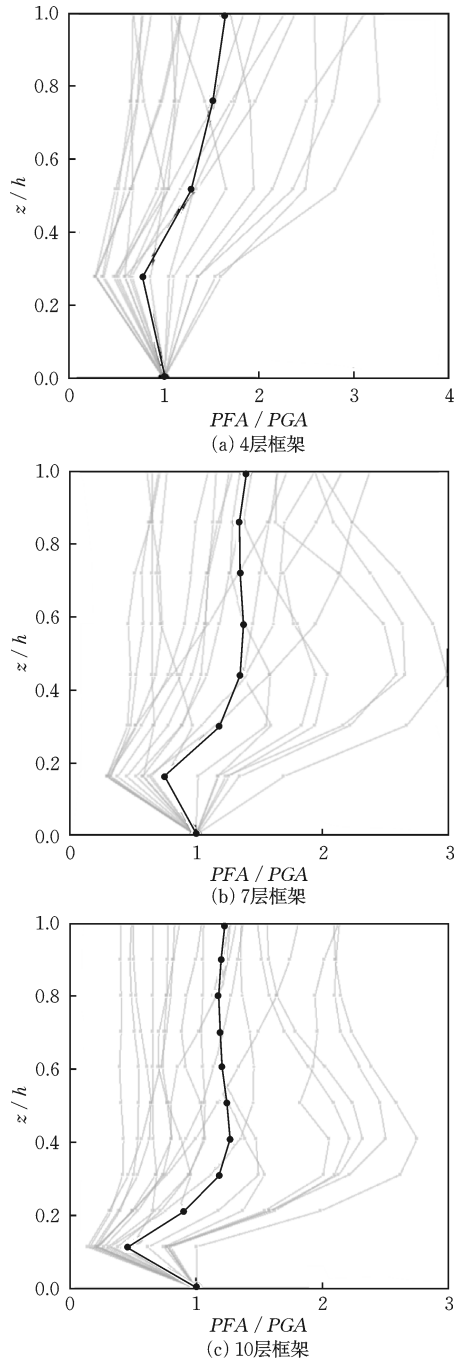


图6 计算楼层高度的放大作用

Fig.6 Amplification effect of calculated floor heights

析,采用P.Fajar^[28-29]提出的基于非弹性需求谱的容量谱方法,得到4层、7层和10层RC框架的延性系数 μ 分别为1.92、2.3、1.67,三栋结构的有效周期分别为1.04、1.49、1.91 s。

图8展示了阻尼比为5%且延性系数不同的三栋结构的FRS经PGA归一化的结果。从图中可以看出,在考虑结构进入塑性阶段的情况下,楼层反应谱与结构基本周期相关的共振区不再位于结构

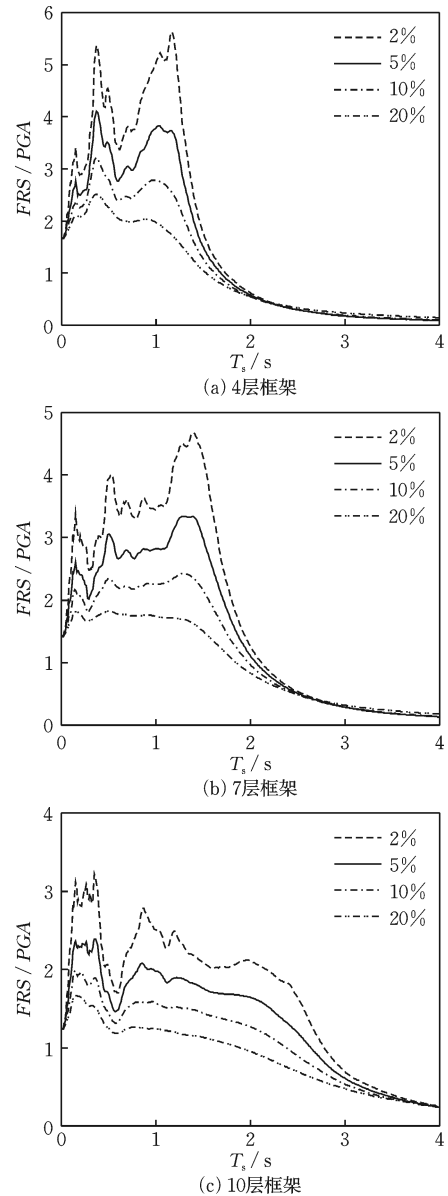


图7 非结构部件阻尼比对楼层反应谱的影响

Fig.7 Influence of damping ratio of non-structural components on floor response spectra

的基本周期处,而是后移到结构有效周期处。这一现象表明,结构弹塑性对楼层反应谱峰值的分布产生了显著影响。此外,随着楼层高度增加,楼层反应谱峰值增大。但在高频处,会出现较低楼层的峰值大于高楼层峰值的情况,这是由于楼层反应谱对高频模态具有较高的敏感性导致的。

3 改进的弹塑性楼层反应谱直接法

基于上述影响楼层反应谱的三个重要因素时程分析结果,在P.Fajar直接法^[12-14]的基础上提出了

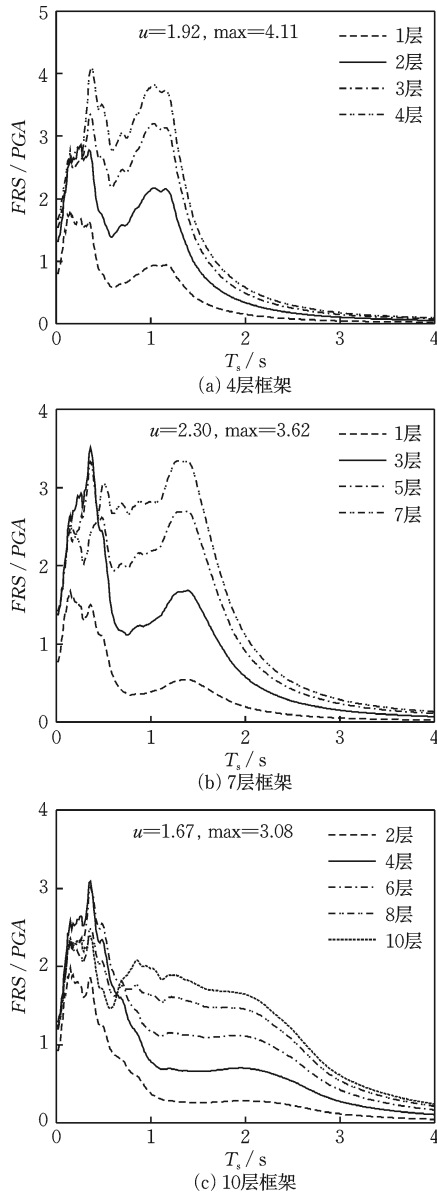


图8 延性系数对于楼层反应谱的影响

Fig 8 Influence of ductility factor on floor response spectra

适用于我国RC框架结构弹塑性情况的楼层反应谱直接法。

3.1 P.Fajfar方法

由于楼层反应谱在共振区和非共振区有很大的区别,不同高度、不同非结构部件阻尼比和不同延性系数下的楼层反应谱存在很大差异。因此,2014年V. Vukobratović等^[12]针对Y. Yasui^[2]方法在共振区的不适用问题提出将共振区单独计算,并且将该方法拓展至单自由度弹塑性情况。V. Vukobratović^[14]在2016年提出基于模态组合的方法,将多自由度系统不同模态等效为单自由度,通过平方

和开平方(SRSS)或者完全二次组合(CQC)的方式得到多自由度的楼层反应谱,并提出将共振区拓宽±15%来考虑共振区不确定性。

在非共振区,不同模态的谱加速度由式(2)得到。

$$A_{s,ij} = \frac{\Gamma_i \phi_{ij}}{|1 - (T_{p,i}/T_s)^2|} \sqrt{[(T_{p,i}/T_s)^2 \frac{S_e(T_{p,i}, \xi_{p,i})}{R_\mu}]^2 + S_e(T_s, \xi_s)^2} \quad (2)$$

式中, $A_{s,ij}$ 表示 i 模态 j 自由度的楼层反应谱值; $T_{p,i}$ 表示结构的 i 阶模态周期; T_s 表示非结构部件的周期; R_μ 为延性折减系数; $S_e(T_{p,i}, \xi_{p,i})$ 表示 i 模态结构阻尼比为 $\xi_{p,i}$ 的谱加速度; $S_e(T_s, \xi_s)$ 表示阻尼比为 ξ_s 的非结构部件的弹性谱加速度。

依据 A. K. Chopra^[30] 的模态分析理论,不同模态的谱加速度必须乘上对应的因子 $\Gamma_i \phi_{ij}$, 其中, ϕ_{ij} 表示 i 模态的 j 自由度的相对位移。 Γ_i 的计算见式(3)。

$$\Gamma_i = \frac{\{\phi_i\}^T [M] \{I\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} \quad (3)$$

式中, ϕ_i 表示第 i 个模态振型; $[M]$ 是结构质量矩阵; $\{I\}$ 是单位向量。对于结构的非弹性模态, ϕ_i 表示非弹性位移形状归一化。在共振区,反应谱值由式(4)给出:

$$A_{s,ij} = AMP_i \times PFA_{ij} \quad (4)$$

式中, AMP_i 表示 i 模态的放大系数,值由式(5)确定:

$$AMP = \begin{cases} 18(1 + \xi_s)^{-0.6} (0.6 + 0.4\mu) \mu^{-0.85}, & T_p/T_g \leq 1 \\ 18(1 + \xi_s)^{-0.6} (T_p/T_g)^{-0.2} (0.6 + 0.4\mu) \mu^{-0.85}, & T_p/T_g > 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, μ 表示结构延性系数,当 μ 等于 1 时,表示结构为弹性的情况; T_g 表示场地特征周期。 AMP 的定义由式(6)给出:

$$AMP_i = \max(A_{s,ij}/PFA_{ij}) \quad (6)$$

式中, PFA_{ij} 表示 i 模态在 j 自由度的峰值楼板加速度,由式(7)确定:

$$PFA_{ij} = \Gamma_i \phi_{ij} \frac{S_e(T_{p,i}, \xi_{p,i})}{R_\mu} \quad (7)$$

图9为采用V. Vukobratović^[14]的方法计算的4层、7层、10层弹塑性框架结构顶层楼层反应谱与时程分析结果对比情况。由图可知,该方法在楼层反应谱高频部分峰值段会过分高估,在不同峰值间的过渡部分存在低估现象,这是该方法只考虑一阶模

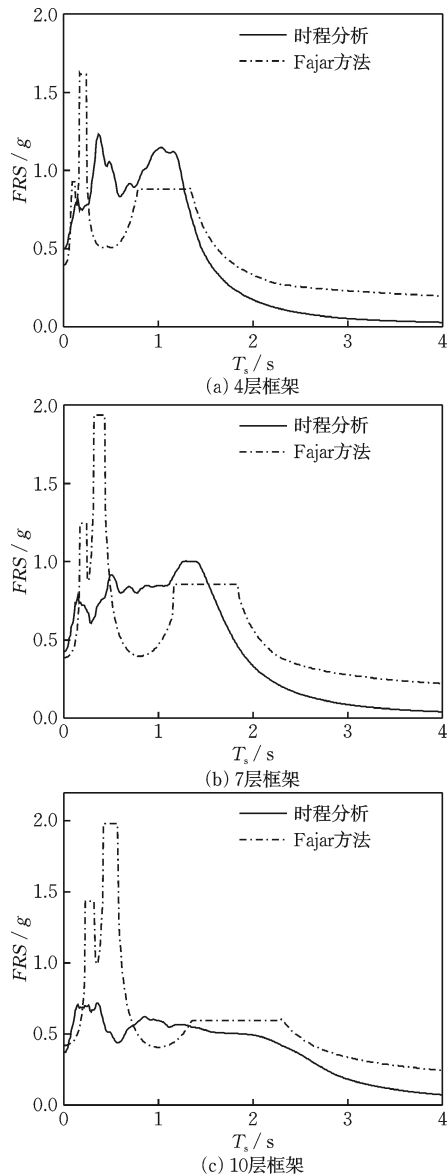


图9 Fajfar方法与时程分析顶层反应谱结果对比

Fig.9 Comparison of top-floor response spectra between Fajfar method and time-history analysis

态的弹性行为所导致的。

3.2 本文改进方法

为了有效解决上述问题,本文对Fajfar方法进行了如下几方面的改进:首先,根据Pushover-N2分析结果,考虑了结构弹塑性对于多阶参与组合模式的影响;其次,选用按照我国规范所设计的结构作为算例,提出了适用于我国的共振区动力放大系数(AMP)的经验公式;最后,采用分段组合的方式构建了楼层的反应谱。对于动力放大系数,通过包络方式进行拟合,最终得到了适用于我国RC框架结构的考虑结构弹塑性行为的AMP公式,如式(8)所

示。

AMP=

$$\begin{cases} 30.41(1+\xi_s)^{-0.8}(0.5+0.5\mu)\mu^{-0.8}, T_p/T_g \leq 1 \\ 30.41(1+\xi_s)^{-0.8}(T_p/T_g)^{-0.3}(0.5+0.5\mu)\mu^{-0.8}, T_p/T_g > 1 \end{cases} \quad (8)$$

分别采用改进的AMP公式和Fajfar方法计算了上述三栋框架结构的顶层动力放大系数,并将计算结果与基于时程分析方法得到的放大系数结果进行了对比,如图10所示。由图10中的结果表明,Fajfar方法不能包络按我国规范^[21]设计的三栋框架结构顶层动力放大系数,而本文研究改进后的动力

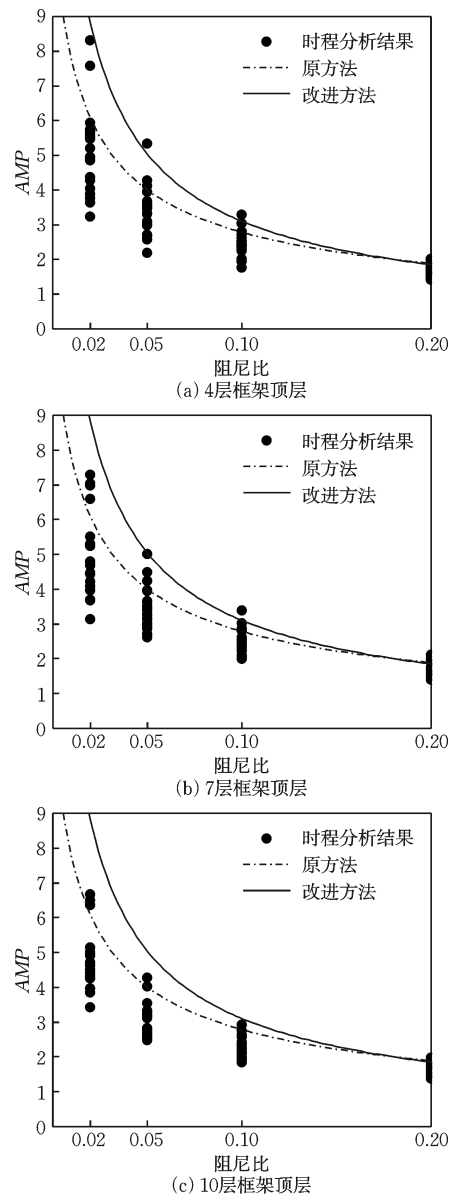


图10 Fajfar方法与改进方法的峰值放大系数对比

Fig.10 Comparison of peak amplification factors between Fajfar method and improved method

放大系数(AMP)公式(8)则基本满足包络需求。

为了探讨结构高阶响应特性对楼层反应谱的影响,需对结构地震响应的组成加以分析。结构的地震响应一般分为两部分,在结构动力学中,一般称为周期性响应与刚性响应。在结构主要呈现周期性响应时,常用的模态组合规则能够提供较为准确的结果。然而,对于以刚性响应为主导的结构高阶模态,采用代数求和的方法则更为合理。在结构的一阶主频处,结构主要表现为周期性响应;而在一阶主频与高频之间,结构的响应往往是周期性响应与刚性响应的混合形式^[14]。

通常认为,低于周期界限频率 f_1 的所有频率,周期性响应占主导地位。而超过刚性频率 f_2 的所有频率,刚性响应占主导。在这两个频率之间,则是由周期分量和刚性分量组合而成。在Gupta方法^[31]中,对于宽频地震动谱, f_1 可以被认为是谱加速度分支的下限对应的频率,而对于 f_2 ,参考NUREG/CR-6645^[32]中的定义,可由式(9)给出:

$$f_2 = (f_1 + 2f_{zPA})/3 \quad (9)$$

式中, f_{zPA} 为零周期加速度对应的频率范围下限,通常假设 f_{zPA} 为33 Hz。再根据我国《建筑抗震设计规范》^[21]可知, f_1 为10 Hz, f_2 为25 Hz,由此可将不同模态的响应情况分离出来。根据Gupta方法, i 模态的刚性部分 Rr_i 和周期部 Rp_i ,分别由式(10)和式(11)给出:

$$Rr_i = R_i \alpha_i \quad (10)$$

$$Rp_i = R_i \sqrt{1 - \alpha_i^2} \quad (11)$$

式中, R_i 为 i 阶模态响应; α_i 由式(12)给出:

$$\alpha_i = \begin{cases} 0 & , f_i \leq f_1 \\ \frac{\ln(f_i/f_1)}{\ln(f_2/f_1)} & , f_1 \leq f_i \leq f_2 \\ 1 & , f_i \geq f_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中, f_i 为第 i 阶模态的频率。

基于上述分析,本研究采用Gupta方法对不同模态的刚性响应与周期响应进行分离。其中,刚性部分通过代数求和的方式进行组合,周期部分则采用SRSS方法进行组合。同时,进一步拓宽峰值段以更好地包络楼层反应谱峰值。改进的方法可以更全面、准确地考虑结构在不同模态下的响应特性,得到更加合理的楼层反应谱。需要注意的是,本文以8度设防弹塑性框架结构作为研究对象,但该方法同样适用于不同设防烈度下的各类建筑结构。此外,若仅考虑弹性情况,可将公式(2)和(8)

中延性系数 μ 设为1进行计算。

3.3 方法验证

为了验证本文提出方法的有效性,重新设计了一栋8度设防的3层框架结构,采用时程法计算其楼层反应谱,并将时程分析结果与本文的改进方法结果进行对比。

框架平面布置与Q. X. Shang等^[20]研究楼层反应谱采用的结构布置相同。改进的直接法对于短周期结构和中周期结构取前三阶模态,模态参与质量在95%左右;而对于长周期结构取前四阶模态,模态参与质量在97%左右,组合不同模态的结果得到楼层反应谱。同时,为了提升方法的便捷性,将式(1)中的反应谱 S_e 改为我国规范^[21]的设计反应谱。改进方法和时程分析方法得到的该框架结构1到3层的楼层反应谱结果对比如图11所示。

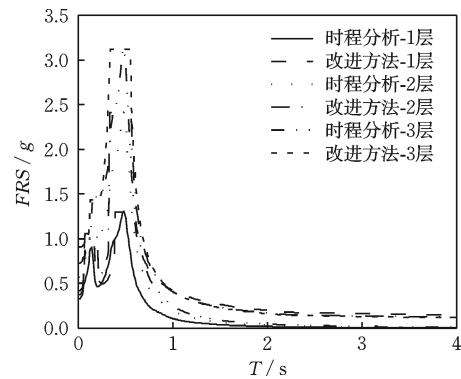


图11 时程分析和提出直接法的楼层反应谱

Fig.11 Floor response spectra from time-history analysis and proposed direct method

由图中的对比结果可以看出,改进方法与时程分析结果的曲线在1层到3层都比较接近。这表明改进方法能够合理地估计结构的楼层反应谱,从而为我国非结构部件的抗震设计提供一种既简洁又高效的方法。

4 结 论

本文以三栋分别代表我国短、中和长周期的典型RC框架结构为研究对象,着重研究了楼层高度、非结构部件阻尼比和结构延性系数三个关键参数对楼层反应谱的影响,并基于此提出了适用于我国RC框架结构弹塑性楼层反应谱的直接法。具体结论如下:

(1)随着楼层高度的不断增高,楼层反应谱明显呈现出增大的趋势;非结构部件的阻尼比对FRS短周期部分有着显著影响,而对大于2s的长周期部分影响逐渐减小;随延性系数增大,结构基频共振区后移趋势越加明显。

(2)结合我国典型RC框架结构动力响应特点,在Fajar弹塑性直接法的基础上推导了适用于我国RC框架结构共振区动力放大系数AMP公式。

(3)通过Gupta方法分离了不同模态中刚性与周期性响应成分,采用分段组合方式得到了我国RC框架结构的地震楼层反应谱直接法,并通过算例与时程法进行对比验证,表明该方法能够合理地估计我国RC框架结构的楼层反应谱。

参考文献:

- [1] FEMA E-74: Reducing the risks of nonstructural earthquake damage—a practical guide[S]. Federal Emergency Management Agency: Washington, D.C., USA, 2012.
- [2] Yasui Y, Yoshihara J, Takeda T, et al. Direct generation method for floor response spectra[C]//Transactions of the 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 12), Kussmaul K (ed.). Stuttgart, Germany: Elsevier Science Publishers B.V., 1993: 367-372.
- [3] ASCE/SEI 7-10: ASCE Standard, minimum design loads for buildings and other structures[S]. American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2010.
- [4] EN 1998-1:2004. European Standard, Eurocode 8-Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings[S]. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2004.
- [5] Villaverde R. Simple method to estimate the seismic nonlinear response of nonstructural components in buildings [J]. Engineering Structures, 2006, 28 (8) : 1209-1221.
- [6] Pinkawa M, Hoffmeister B, Feldmann M. A critical review of current approaches on the determination of seismic force demands on nonstructural components [C]// Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, Cunha A, Caetano E, Ribeiro P, Müller G., (eds). Porto, Portugal: European Association for Structural Dynamics, Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP), 2014.
- [7] Medina R A, Sankaranarayanan R, Kingston K M. Floor response spectra for light components mounted on regular moment-resisting frame structures [J]. Engineering Structures, 2006, 28(14): 1927-1940.
- [8] Calvi P M, Sullivan T J. Estimating floor spectra in multiple degree of freedom systems [J]. Earthquakes and Structures, 2014, 7(1): 17-38.
- [9] Sullivan T J, Calvi P M, Nascimbene R. Towards improved floor spectra estimates for seismic design [J]. Earthquakes and Structures, 2013, 4(1): 109-132.
- [10] Wieser J, Pekcan G, Zaghi A E, et al. Floor accelerations in yielding special moment resisting frame structures [J]. Earthquake Spectra, 2013, 29(3): 987-1002.
- [11] Moschen L, Vamvatsikos D, Adam C. Towards a static pushover approximation of peak floor accelerations [C]//In Proceedings of the Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vienna, Austria: Austrian Association for Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vienna University of Technology: Paper No. 94, 2013.
- [12] Vukobratović V, Fajfar P. A method for the direct determination of approximate floor response spectra for SDOF inelastic structures [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(5): 1405-1424.
- [13] Vukobratović V. The influence of nonlinear seismic response of structures on the floor acceleration spectra [D]. Ljubljana, Slovenia: University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, 2015.
- [14] Vukobratović V. A method for the direct estimation of floor acceleration spectra for MDOF [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(15) : 2495-2511.
- [15] 李忠献,陈岩,梁万顺,等.核电厂结构的楼层反应谱分析[J].福州大学学报(自然科学版),2005,33(增1):62-67.
Li Z X, Chen Y, Liang W S, et al. Floor response spectrum analysis of nuclear power plant structure [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2005, 33(Sup1): 62-67. (in Chinese)
- [16] 徐熙,蒲武川.考虑地震动持时影响的非结构构件加速度响应预测[J].地震工程与工程振动,2019,39(3):230-237.
Xu X, Pu W C. Estimation of the acceleration of non-structural component considering the effect of duration of earthquake ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39 (3) : 230-237. (in Chinese)
- [17] 李建波,林皋,钟红,等.核电结构设计中参数不确定性对楼层谱计算影响分析[J].大连理工大学学报,

- 2011, 51(5): 725-730.
- Li J B, Lin G, Zhong H, et al. Analyses of effect of parameter uncertainty in NPP design on computation of floor response spectra [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(5): 725-730. (in Chinese)
- [18] 刘燕军, 林皋, 李建波, 等. 计算核电厂楼层反应谱的直接法及其对比分析[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2): 93-99.
- Liu Y J, Lin G, Li J B, et al. A direct method for computation of floor response spectrum of a nuclear power plant [J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(2): 93-99. (in Chinese)
- [19] Jiang W, Li B, Xie W C, et al. Generate floor response spectra: Part 1. Direct spectra-to-spectra method [J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 293: 525-546.
- [20] Shang Q X, Li J C, Wang T. Floor acceleration response spectra of elastic reinforced concrete frames [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103558.
- [21] 建筑抗震设计规范:GB 50011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [22] 张令心, 王子铭, 朱柏洁. 近场地震动对我国RC框架结构地震响应影响分析[J]. 世界地震工程, 2024, 40(4): 39-50.
- Zhang L X, Wang Z M, Zhu B J. Analysis of the influence of near-field ground motion on the seismic response of RC frame structure in China [J]. World Earthquake Engineering, 2024, 40(4): 39-50. (in Chinese)
- [23] Qu Z, Gong T, Li Q, et al. Evaluation of the fishbone model in simulating the seismic response of multistory reinforced concrete moment-resisting frames [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 18(2): 315-330.
- [24] Zhai C H, Xie L L. A new approach of selecting real input ground motions for seismic design: The most unfavorable real seismic design ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(8): 1009-1027.
- [25] 陆新征, 叶列平, 潘鹏, 等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 II: 关键构件试验 [J]. 建筑结构, 2012, 42(11): 23-26.
- Lu X Z, Ye L P, Pan P, et al. Pseudo-static collapse experiments and numerical prediction competition of RC frame structure II: Key elements experiment [J]. Building Structure, 2012, 42(11): 23-26. (in Chinese)
- [26] 蒋利学, 郑乔文. 砖填充墙加固前后钢筋混凝土框架抗震性能试验 [J]. 工业建筑, 2009, 39(10): 40-47.
- Jiang L X, Zheng Q W. Tests of seismic behavior of reinforced concrete frames with infilled wall or strengthened infilled wall [J]. Industrial Construction, 2009, 39(10): 40-47. (in Chinese)
- [27] 刘荣恒, 柏文, 戴君武, 等. 基于强震记录的建筑结构楼层设计谱研究 [J]. 工程力学, 2024, 41(12): 176-188.
- Liu R H, Bai W, Dai J W, et al. Study on floor design spectrum of building structure based on strong earthquake records [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(12): 176-188. (in Chinese)
- [28] Fajfar P. Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(9): 979-993.
- [29] Fajfar P. A nonlinear analysis method for performance-based seismic design [J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(3): 573-592.
- [30] Chopra A K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (4th edn) [M]. Prentice Hall: Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 2012.
- [31] Gupta A K, Jaw J W. A new instructure response spectrum (IRS) method for multiply connected secondary systems with coupling effects [J]. Nuclear Engineering and Design, 1986, 96(1): 63-80.
- [32] NUREG/CR-6645: Reevaluation of regulatory guidance on modal response combination methods for seismic response spectrum analysis [S]. U.S. Nuclear Regulatory Commission: Washington, D.C., USA, 1999.

(本文编辑:张艺)