

结构动力时程分析的地震动选择方法研究

张耀庭[†], 刘勇, 沈杰, 邹志文, 余昕叶

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 进行结构动力时程分析时,合理地选择地震动一直是工程中的难点问题.为此,通过改进现有的和声搜索法进行地震动的选取,针对依据我国现规范设计的两榀不同周期的预应力混凝土(PC)框架结构进行了动力时程分析,并与周期点法、双频段法和面积法的计算结果进行对比.分析表明:多遇地震作用下,周期点法和改进的和声搜索法的结构响应参数的离散性更小,其变异系数在 10%左右,且与振型分解反应谱法得到的底部剪力相比,双频段法和改进的和声搜索法得到的计算结果更加符合规范设计水准;罕遇地震作用下,面积法和改进的和声搜索法的结构响应参数的离散性更小,其变异系数在 15%左右,周期点法计算结果离散性最大;周期点法只适用于弹性时程分析的地震动选择过程,改进的和声搜索法无论是对弹性时程分析还是弹塑性时程分析都适用,且满足规范设计水准和工程需求.

关键词: 动力时程分析;地震动;反应谱;改进的和声搜索法;结构响应参数

中图分类号: P315

文献标志码: A

Research on Ground Motion Selection Method for Time-history Analysis of Structure

ZHANG Yaoting[†], LIU Yong, SHEN Jie, ZOU Zhiwen, YU Xinye

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the process of structural dynamic time-history analysis, reasonable ground motion selection is always a difficult point in engineering. By improving the existing harmony search method for ground motion selection, dynamic time-history analysis is performed for two differently periodic prestressed concrete (PC) frame structures designed according to currently Chinese codes. Then, it is compared with the periodic point method, the dual-band method and the area method for calculation results. The results show that the discreteness of structural response parameters of the periodic point method and the improved harmony search method is smaller in frequently earthquake, and the coefficient of variation is about 10%. Compared with the base shear force of mode-superposition response spectrum method, the dual-band method and the improved harmony search method are more in accordance with the standard design. Structural response parameters of the area method and the improved harmony search method are smaller dispersion in rarely earthquake, and the coefficient of variation is about 15%. Furthermore, the results of the periodic point method are the most dispersion. The periodic point method is only applicable to the ground motion selection process of elastic time-history analysis. The improved harmony search method is applicable to both elastic and

* 收稿日期:2019-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278218), National Natural Science Foundation of China(51278218)

作者简介:张耀庭(1965—),男,湖北红安人,华中科技大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: zyt1965@mail.hust.edu.cn

elastic-plastic time-history analysis, which can meet standard design and engineering requirement.

Key words: dynamic time-history analysis; ground motion; response spectrum; improved harmony search method; structural response parameters

随着计算机以及有限元技术的不断发展,结构抗震性能研究广泛地采用动力时程分析方法,同时《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[1]规定某些特定建筑需要采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算,而合理的地震动输入是保证计算结果相对准确的前提.地震动本身就具有极强的随机性,不同的地震动计算结果差距可能高达数倍,而大部分研究者或工程人员采用的是标准化的实际地震动,并未考虑场地和结构特性,从而导致结构响应存在较大的离散性和不合理性^[2].

从20世纪80年代起,国内外众多学者对地震动进行了大量的研究,并提出了一些地震动选择方法. Nau^[3]等提出了基于地震反应谱的缩放选波方法,这种方法的思路后来也被广泛接受,很多西方规范中推荐的方法均受其影响. Naeim^[4]等利用遗传优化算法进行地震动的选择,使其反应谱中值与设计反应谱相匹配. Nirmal 等^[5]利用蒙特卡洛法和贪婪算法提出了一种更有效的地震动的选择方法,选出的地震动记录的反应谱均值与设计反应谱高度匹配,离散性也较小. Haydar^[6]等提出了用和声搜索法进行基于欧洲规范下的地震动选择,结果表明所选地震动的平均反应谱与规范目标谱有较好匹配.《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[1]要求在结构的主要周期点处所选地震动反应谱与规范设计反应谱统计意义上相符(简称周期点法),但规范过于笼统,使其可操作性较差. 王亚勇^[7-8]等提出了一种基于反应谱形状特征的选择地震动的方法,并以规范中加速度设计反应谱为标准,接近场地震、远场地震和反应谱特征周期分类的方法对地震动进行分组. 杨溥^[9]等提出基于规范设计反应谱平台段和结构基本自振周期段的两频率段控制的选波方案(简称双频段法),依据所选地震动的反应谱与设计反应谱一致的原则,对比分析得出该方法的合理性. 高炳鹏^[10]等提出对场地特征周期及结构基本周期附近反应谱与规范设计反应谱的面积进行拟合(简称面积法),并与周期点法进行对比分析得出各方法适用性. 综上所述,地震动选择的基本思路均是让所选择地震动的反应谱

与相应的设计反应谱相一致,但在所选地震动反应谱与设计反应谱的匹配程度上尚存有争议.

为此,本文根据我国规范设计了两幅不同周期的PC框架结构,利用 Matlab 分别得到周期点法、双频段法、面积法以及改进的和声搜索法最优的7条地震动. 在 OpenSees 中进行动力时程分析,并对比其结果的准确性和离散性,以期能为结构抗震分析时,合理地确定地震动的选择方法提供参考依据.

1 地震动备选数据库

随着地震动记录不断地收集,全世界的实际地震动数据库也在不断的扩大,本文从美国太平洋地震工程研究中心(PEER)的 NGA-West2 中选择了一组含有766条水平强地震动的地震动集作为地震动备选数据库,在本文研究中,对每个地震动仅考虑两条水平分量的加速度记录. 地震动备选数据库的选择标准如下^[11-12]:

- 1)地震动震级:所选地震动震级为6.0~8.0;
- 2)断层距:场地的断层距为0~60 km;
- 3)场地类型:场地类型为C类,剪切波速为260 m/s $\leq V_{s30} \leq 510$ m/s,对应国内的II类场地;
- 4)地面峰值加速度:PGA > 0.05 g,保证备选地震动有一定的强度;
- 5)有效持时:需满足 $D_{5-95} \geq 15$ s.

根据上述标准在 PEER 中选出了766条满足要求的地震动记录,其加速度反应谱如图1所示.

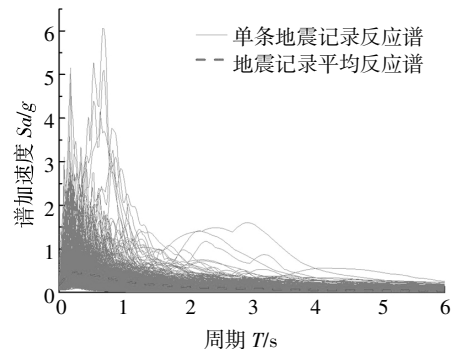


图1 备选766条地震动加速度反应谱($\xi = 3\%$)

Fig.1 Alternative 766 earthquake acceleration response spectra($\xi = 3\%$)

2 地震动选择方法

地震动选择的基本原则是要求所选地震动的加速度反应谱与设计反应谱相一致,但实际地震动加速度反应谱不可能与设计反应谱在全周期都有很好的匹配,所以在匹配的周期段和方法上都具有较大的可研究性.以下是对4种地震动选择方法(记为A、B、C、D)进行的对比分析.

2.1 周期点法(方法A)

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[1]规定了时程分析法中多遇地震和罕遇地震下的弹性和弹塑性验算的方法,且在建筑抗震计算时某些建筑还需采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算.当取7条及7条以上的时程曲线时,计算结果取时程法的平均值和振型分解反应谱法的较大值.对于地震动的选择方法,其中也规定了在采用时程分析法时,多条时程曲线的平均地震影响系数曲线应与设计反应谱在统计意义上相符.虽然规范对选波方法提出了一定的要求,但具体的实施过程并没有详细的规定,从而导致操作人员在选波过程中也存在着差异,该方法的研究步骤主要分为3步:

1)根据场地建筑的抗震设防烈度和地震烈度水准在规范中得到相应的加速度时程的最大值,并把备选的766条地震动的加速度最大值统一线性调幅到相应的值.

2)利用Matlab软件编写选波程序,得到7条与设计反应谱在统计意义上相符的地震动.即每条地震动的加速度反应谱与设计反应谱相比,在结构的前三周期(主要振型周期)相差都不大于20%,这样保证了所选地震动在进行时程分析时与振型分解反应谱法计算结果的一致性.再根据三个主要振型周期上反应谱的差值的均方根误差(RMSE)从小到大依次选择出7条合理的地震动.

3)规范中对时程分析的计算结果也进行了相关的规定:在进行弹性时程分析时,每条时程曲线计算所得的结构底部剪力不应小于振型分解法计算的65%;多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的80%,如均满足即为本方法最合理的地震动选择.

2.2 双频段法(方法B)

双频段法主要是在杨溥^[2]等人的研究基础上进行了一定的改进,得出了更有效的关于双频段的地震动选择方法.该方法对反应谱进行了两个频段的

控制:分别是对规范设计反应谱中的 $[0.1, T_g]$ 平台段和结构基本周期 T_1 附近 $[T_1 - 0.2, T_1 + 0.5]$ 段进行控制,要求每条所选地震动的加速度反应谱在这两段的值与设计反应谱分别相差不超过10%.该方法的研究步骤主要分为两步:其一同周期点法中的步骤1;其二是利用Matlab软件编写选波程序,得到在双频段上分别满足要求的地震动,并根据双频段上反应谱差值的RMSE从小到大依次选择出7条合理的地震动.

2.3 面积法(方法C)

面积法主要是在高炳鹏^[3]等人的论述方法中进行了一定的调整,同时也方便与双频段法的对比,该方法对两个频段的反应谱面积值进行了控制:分别是对规范设计反应谱中的 $[0.1, T_g]$ 平台段和结构基本周期 T_1 附近 $[T_1 - 0.2, T_1 + 0.5]$ 段进行控制,要求每条所选地震动的加速度反应谱在这两段的面积值与设计反应谱中的面积值分别相差不超过10%,该方法的具体研究步骤与双频段法类似.

2.4 改进的和声搜索法(方法D)

和声搜索算法^[4]是一种启发式全局搜索算法,该方法的最初灵感来源于音乐演奏中乐师们凭借自己的记忆,通过反复调整乐队中各乐器的音调,最终达到一个美妙和声状态过程的模拟.HS算法将乐器 i ($i = 1, 2, \dots, m$,此处为所有备选地震动编号)类比为优化问题中的第 i 个设计变量,各乐器声调的和声 H_j ($j = 1, 2, \dots, HMS$,此处为地震动集的组号)相当于优化问题的第 j 个解向量,评价标准类比为问题公式化后的目标函数.算法首先产生HMS(和声记忆库大小)个初始解放入和声记忆库HM内,以概率HMCR(和声记忆库取值概率)在HM内搜索新解,以概率 $1 - HMCR$ 在HM外变量可能值域中搜索.然后算法以概率PAR(音调微调概率)对新解在 $\pm BW$ (音调微调带宽)范围内进行局部扰动.若新解的目标函数值优于HM内的最差解,则替换之;否则保持HM不变,然后不断迭代,直至达到预定迭代次数 T_{max} 为止,最终得到最优的和声解向量(此处为最优的地震动集).Geem^[4]等提出了和声搜索优化算法后,该方法大量的应用于各种优化组合的问题,同时较遗传算法、模拟退火算法和禁忌搜索等算法有更好的计算效率和精确度.

一组地震动的选择也是一种优化组合的问题,所以也适用于地震动的选取.Haydar^[6]等提出了用和声搜索法进行基于欧洲规范下的地震动选择,针对

不同场地类别以及控制参数分别选出 7 条地震动记录, 结果表明所选地震动的平均反应谱与规范目标谱比较接近, 能很好的满足规范要求. 黄丹^[12]提出了基于优化级排序的改进后的和声搜索法, 并得到了适用于我国规范的地震动记录, 通过选出的 50 组地震动进行结构的动力时程分析, 验证了该方法的适用性和稳定性. 虽然上述和声搜索方法都能选择出平均反应谱与规范设计反应谱较匹配的地震动记录, 但由于在定义约束条件时, 没有对单条地震动进行约束, 以及进行地震动选择时, 没有考虑结构本身的特征, 从而导致选出单条地震动的反应谱与设计反应谱差异较大, 且作用于结构进行动力时程分析时结构响应的离散性也较大.

由于约束条件不同, 其地震动选择结果也会有较大的差异, 本文对其约束条件进行一定的改进. 为了考虑结构本身的特征, 在选择地震动时, 要求所选单条地震动的结构基本周期处反应谱值与设计反应谱值在统计意义上相符, 在约束条件中添加一个与结构基本周期相关的约束, 最终得到一组使结构响应离散性较小的地震动记录. 该方法主要分为以下步骤, 其算法程序见图 2.

1) 同周期点法的步骤 1;

2) Matlab 编程处理, 问题公式化并得到目标函数 $f(x)$ 的表达式;

$$f(x) = e + g_1 + g_2 + g_3 \quad (1)$$

式中: e 所选地震动反应谱均值与设计反应谱值在特定周期内差值的均方根误差, 其取值如下式:

$$e = \sqrt{[\sum (S_{ai}^{mean} - S_{ai}^{t arg et})^2] / n} \quad (2)$$

式中: S_{ai}^{mean} 、 $S_{ai}^{t arg et}$ 分别为某周期处所选地震动反应谱均值和设计反应谱值, n 为周期点个数;

g_1 —约束条件 1, 控制所选地震动反应谱均值与设计反应谱在特定周期内每点的差值在 10% 以内, 其取值如下式:

$$g_1 = \begin{cases} \max[S_{ai}^{mean} / S_{ai}^{t arg et}] - 1.1 & > 0 \\ 0.9 - \min[S_{ai}^{mean} / S_{ai}^{t arg et}] & > 0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

g_2 —约束条件 2, 确保每组地震动不能出现相同的地震动, 其取值如下式:

$$g_2 = \begin{cases} 1 & \text{地震动重复} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

g_3 —约束条件 3, 控制每条所选地震动在结构基本周期处其加速度反应谱值与设计反应谱值在 20% 以内, 其取值如下式:

$$g_3 = \begin{cases} 1 & \max[S_a^T / S_a^{t arg et-T_1}] > 1.2 \\ 1 & \min[S_a^T / S_a^{t arg et-T_1}] > 0.8 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

式中: S_a^T 、 $S_a^{t arg et-T_1}$ 分别为结构基本周期处单条所选地震动反应谱值和设计反应谱值.

3) 确定控制参数: Geem^[15]等研究结果推荐 HM-CR 在 0.7 到 0.95 之间, PAR 在 0.2 到 0.5 之间以及 HMS 在 10 到 50 之间. Degertekin^[16]推荐 HMCR 取 0.8, PAR 取 0.4 以及 HMS 取值在 50 到 100 之间. 本研究中, HMCR 为 0.8, PAR 为 0.4, HMS 为 50, BW 与地震动备选数据库大小相关并取值为 20, 最大迭代次数 (T_{max}) 为 1 000 000 和匹配周期段为 $[0.5T_1, 2T_1]$.

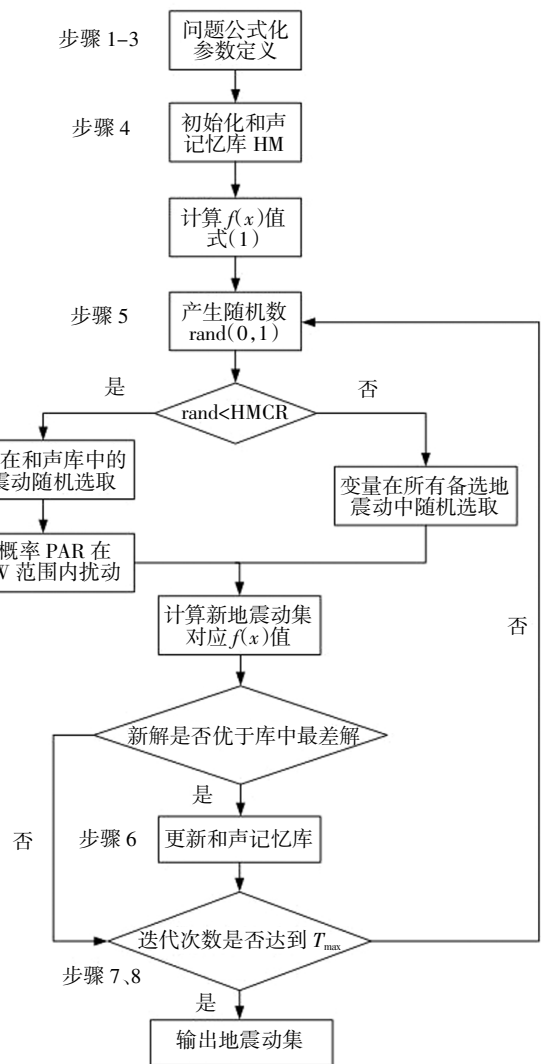


图 2 改进的和声搜索法程序

Fig.2 The program of improved harmony search method

4) 初始化和声记忆库(HM): 在地震动备选数据库中随机选择 HMS 组地震动, 通过式(1)计算每组地震动的 $f(x)$ 值;

5)即兴生成新的和谐解向量:通过和声记忆库取值概率(HMCR)、音调微调概率(PAR)、音调微调带宽(BW)进行即兴创作,生成一个新的和谐解向量;

6)更新和声记忆库(HM):当即兴生成的和谐解向量的 $f(x)$ 值小于和声记忆库中 $f(x)$ 的最大值时,则用该和谐解向量取代 $f(x)$ 最大值的向量;否则,保持原来的和声记忆库不变。

7)重复步骤 5,6,直至达到最大迭代次数。

8)最终得到 50 组分别含有 7 条地震动的集合,并选出 $f(x)$ 值最小的地震动集。

3 地震动选取算例及分析

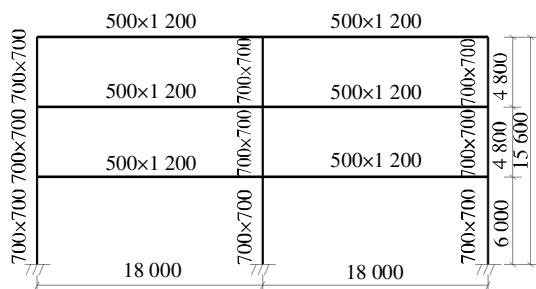
3.1 结构分析模型

本文按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[4]、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[17]和《预应力混凝土结构抗震设计规程》(JGJ 140—2004)^[18]设计了两榀 PC 框架结构,层数分别为 3 层(YKJ01)和 8 层(YKJ02),框架的抗震等级分别为二级和一级。抗震设防烈度为 8 度,设计基本加速度值为 0.2 g,场地类别为 II 类场地,设计地震分组为第一组,场地特征周期为 0.35 s,结构阻尼比为 0.03。女儿墙等效线荷载为 2.5 kN/m,填充墙等效线荷载为 10 kN/m,结构荷载信息见表 1,框架结构立面和平面信息分别见图 3 和图 4,并选取 C 轴框架进行结构分析。

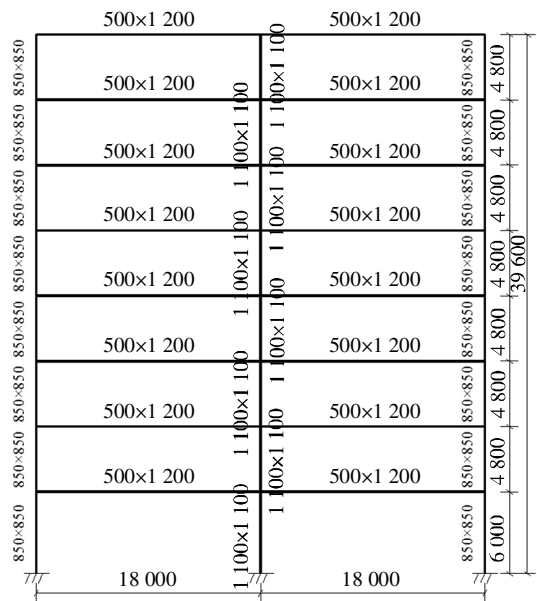
表 1 结构荷载信息

Tab.1 Structural load information

荷载分布	荷载类别	荷载值/(kN·m ²)
楼面荷载	恒载	5.0
	活载	3.0
屋面荷载	恒载	6.0
	活载	2.0



(a)YKJ01 框架(抗震等级为二级)



(b)YKJ02 框架(抗震等级为一级)

图 3 框架结构立面图

Fig.3 Elevation of frame structures

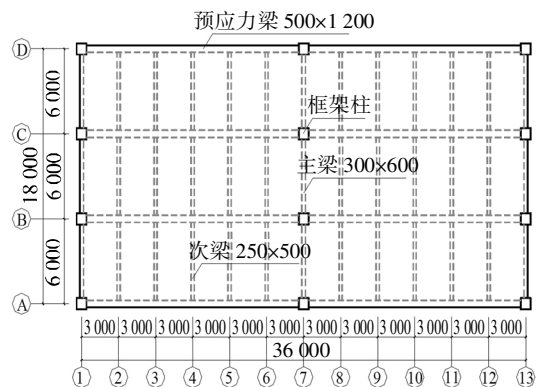


图 4 框架结构平面图

Fig.4 Plane of frame structures

屋面和楼面板厚 120 mm,混凝土强度等级为 C30,梁、柱混凝土强度等级为 C45,预应力筋采用极限抗拉强度标准值 f_{ptk} 为 1 860 MPa 的 $\phi^15.2$ 低松弛钢绞线,纵筋和箍筋均采用 HRB400 级钢筋,配筋信息见表 2,其前三阶结构周期见表 3。

表 2 梁柱配筋信息

Tab.2 Reinforcement information of beam and column

框架编号	中柱配筋	边柱配筋	梁顶配筋	梁底配筋	预应力筋
YKJ01	8C28	8C28	6C25	6C25	13 $\phi^15.2$
YKJ02	12C28	10C28	8C28	4C28+4C25	13 $\phi^15.2$

注:柱为每边配筋,梁为通长配筋,梁柱箍筋均为 A10@100。

表3 PC 框架前三阶周期
Tab.3 The first three period of the PC frame

周期/s	YKJ01			YKJ02		
	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
PKPM	0.876	0.280	0.152	1.641	0.529	0.292
OpenSees	0.871	0.272	0.149	1.578	0.499	0.275
误差/%	0.6	2.9	2.0	3.8	5.7	5.8

本文用 OpenSees 进行建模分析,混凝土本构采用 Concrete02 模型,考虑了混凝土的受拉性能和箍筋的约束效应;普通钢筋本构采用 Steel02 模型,考虑了钢筋等向应变硬化影响和包辛格效应;预应力筋本构采用 Hysteretic 模型,考虑了其滞回捏拢效应和卸载刚度退化,并通过 Initial Strain Material 模型给预应力筋初始应变以施加预应力^[19-21]。

考虑楼板对梁刚度的影响,预应力梁采用 T 型截面,两侧翼缘宽度均取 6 倍板厚,梁、柱混凝土截面分为核心区和保护区,见图 5。框架的普通钢筋混凝土部分采用非线性梁柱单元,PC 梁由普通钢筋混

凝土单元、预应力筋和刚臂单元组成。每根 PC 梁划分为 12 个单元,每根柱划分为 4 个单元,每个单元均包含 4 个 Gauss-Lobatto 积分点。

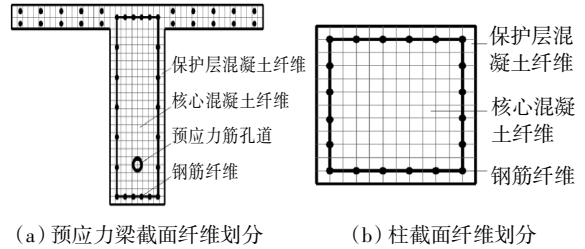


图5 框架梁、柱截面纤维划分

Fig.5 Section mesh for beam and column fiber models

3.2 地震动选择

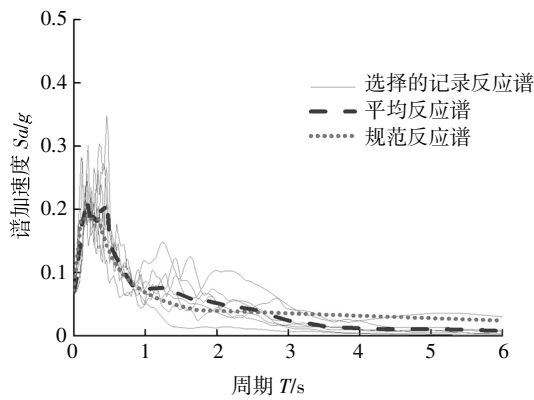
利用上述 4 种地震动选择方法,对各条备选地震动加速度反应谱进行不同条件下与目标谱的匹配,分别在 766 条地震动备选数据库中选出合适的 7 条地震动,各个方法选取的地震动记录见表 4 和表 5,其地震动加速度反应谱见图 6~9,且得到的地震动加速度反应谱与规范设计反应谱的统计特性在各自匹配段均具有较好的一致性。

表4 方法 A 和方法 B 选取的地震动记录
Tab.4 Selection of ground motion records for method A and B

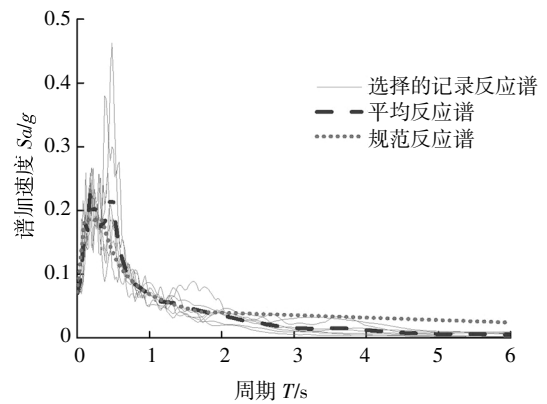
地震动记录	YKJ01	YKJ02
方法 A	1 RSN551_CHALFANT.A_A-CVK000	RSN5760_IWATE_YMT017EW
	2 RSN366_COALINGA.H_H-VC6090	RSN535_PALMSPR_H06360
	3 RSN2699_CHICHI.04_CHY024E	RSN735_LOMAP_A07000
	4 RSN3021_CHICHI.05_HWA034N	RSN93_SFERN_WND233
	5 RSN930_BIGBEAR_SB2270	RSN551_CHALFANT.A_A-CVK090
	6 RSN1002_NORTHR_VRM090	RSN6896_DARFIELD_DORCN70E
	7 RSN5619_IWATE_IWT011EW	RSN906_BIGBEAR_H05090
方法 B	1 RSN551_CHALFANT.A_A-CVK000	RSN551_CHALFANT.A_A-CVK000
	2 RSN5783_IWATE_54026NS	RSN1190_CHICHI_CHY019-N
	3 RSN1615_DUZCE_1062-N	RSN800_LOMAP_SJW160
	4 RSN457_MORGAN_G03090	RSN6893_DARFIELD_DFHSS17E
	5 RSN3470_CHICHI.06_TCU072N	RSN6948_DARFIELD_OXZE
	6 RSN366_COALINGA.H_H-VC6090	RSN457_MORGAN_G03090
	7 RSN5274_CHUETSU_NIG028EW	RSN1033_·NORTHR_LIT180

表 5 方法 C 和方法 D 选取的地震动记录
Tab.5 Selection of ground motion records for method C and D

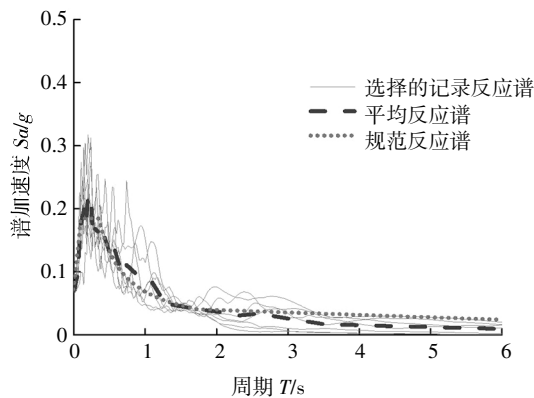
地震动记录	YKJ01	YKJ02
方法 C	1 RSN880_LANDERS_MCF000	RSN15_KERN_TAF021
	2 RSN1785_HECTOR_FVR360	RSN985_NORTHR_BLD090
	3 RSN28_PARKF_C12050	RSN3026_CHICHI.05_HWA039N
	4 RSN78_SFERN_PDL210	RSN5745_IWATE_YMT002EW
	5 RSN535_PALMSPR_H06360	RSN551_CHALFANT.A_A-CVK000
	6 RSN5287_CHUETSU_NIGH14EW	RSN4205_NIIGATA_NIG015EW
	7 RSN3994_SANSIMEO_36153360	RSN3994_SANSIMEO_36153360
方法 D	1 RSN366_COALINGA.H_H-VC6090	RSN4205_NIIGATA_NIG015NS
	2 RSN968_NORTHR_DWN360	RSN5275_CHUETSU_NIGH01NS
	3 RSN5494_IWATE_AKTH18EW	RSN5284_CHUETSU_NIGH11NS
	4 RSN762_LOMAP_FRE000	RSN5760_IWATE_YMT017EW
	5 RSN6897_DARFIELD_DSCLN27W	RSN6886_DARFIELD_CACSN50W
	6 RSN551_CHALFANT.A_A-CVK090	RSN1512_CHICHI_TCU078-E
	7 RSN4193_NIIGATA_NGNH29NS	RSN530_PALMSPR_PSA090



(a)依 YKJ01 特性所选地震动加速度反应谱



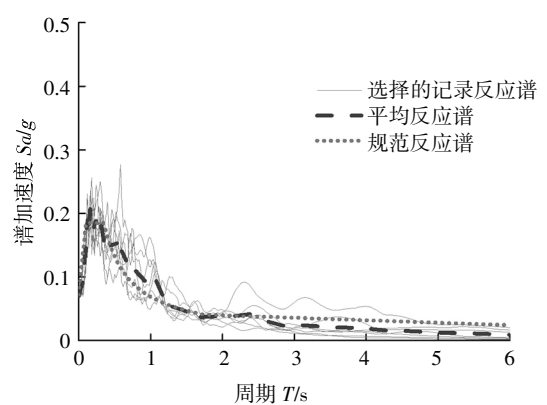
(a)依 YKJ01 特性所选地震动加速度反应谱



(b)依 YKJ02 特性所选地震动加速度反应谱

图 6 方法 A 地震动选择结果

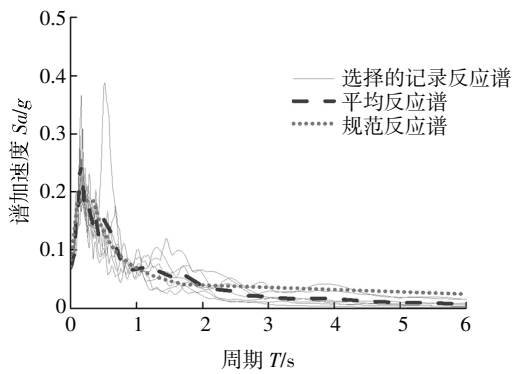
Fig.6 Result of ground motion selection for method A



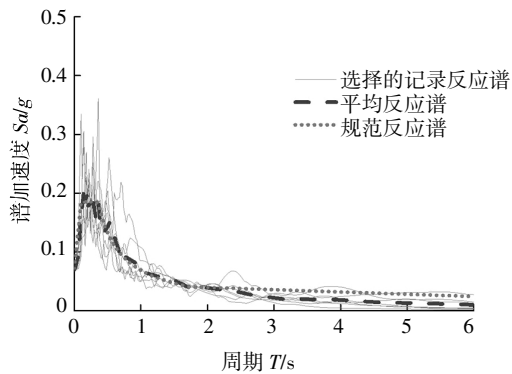
(b)依 YKJ02 特性所选地震动加速度反应谱

图 7 方法 B 地震动选择结果

Fig.7 Result of ground motion selection for method B



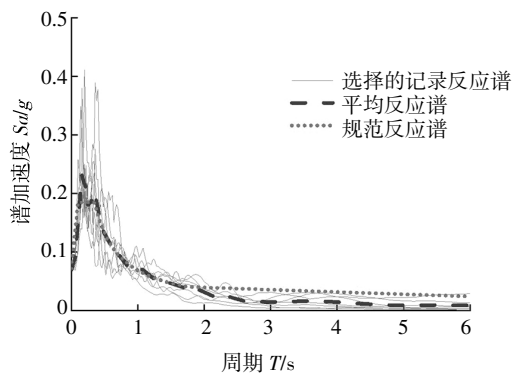
(a)依 YKJ01 特性所选地震动加速度反应谱



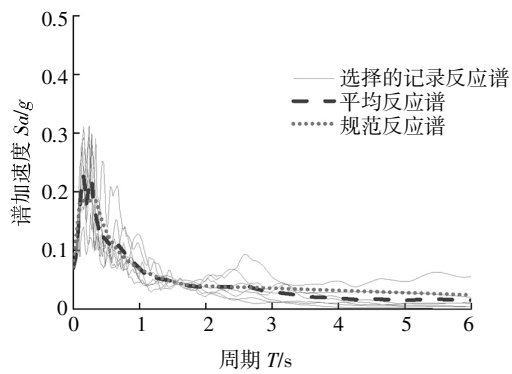
(b)依 YKJ02 特性所选地震动加速度反应谱

图 8 方法 C 地震动选择结果

Fig.8 Result of ground motion selection for method C



(a)依 YKJ01 特性所选地震动加速度反应谱



(b)依 YKJ02 特性所选地震动加速度反应谱

图 9 方法 D 地震动选择结果

Fig.9 Result of ground motion selection for method D

3.3 结构动力时程分析结果对比分析

本文利用上述 4 种方法得到的地震动进行动力时程分析输入, 分别计算结构在多遇地震和罕遇地震作用下的响应, 包括底部剪力、顶点位移和最大层间位移角, 分析结果见表 6 和表 7. 其中多遇地震下加速度峰值取为 70 cm/s^2 , 罕遇地震下加速度峰值取为 400 cm/s^2 .

表 6 多遇地震作用下结构动力响应

Tab.6 Structural dynamic response under frequently earthquake

框架结构	方法	底部剪力/kN		顶点位移/mm		最大层间位移角/%	
		μ	σ/μ	μ	σ/μ	μ	σ/μ
YKJ01	A	595.46	0.08	17.58	0.08	0.14	0.07
	B	616.87	0.16	18.22	0.16	0.15	0.14
	C	562.22	0.17	17.02	0.13	0.13	0.14
	D	606.61	0.11	18.46	0.13	0.14	0.10
YKJ02	A	966.97	0.14	35.78	0.11	0.13	0.14
	B	943.19	0.20	36.27	0.13	0.13	0.13
	C	979.50	0.09	38.69	0.06	0.14	0.06
	D	936.10	0.08	35.20	0.09	0.13	0.06

表 7 罕遇地震作用下结构动力响应

Tab.7 Structural dynamic response under rarely earthquake

框架结构	方法	底部剪力/kN		顶点位移/mm		最大层间位移角/%	
		μ	σ/μ	μ	σ/μ	μ	σ/μ
YKJ01	A	2 470.6	0.11	106.9	0.24	0.92	0.29
	B	2 339.6	0.10	95.1	0.18	0.79	0.19
	C	2 438.6	0.09	95.4	0.15	0.85	0.17
	D	2 465.0	0.10	97.8	0.21	0.88	0.26
YKJ02	A	4 402.1	0.13	208.9	0.28	0.85	0.26
	B	3 884.8	0.15	192.0	0.16	0.72	0.22
	C	4 277.9	0.14	216.0	0.13	0.84	0.20
	D	4 322.6	0.09	204.6	0.13	0.80	0.13

由表 6 多遇地震作用下结构的动力响应可以看出方法 A 和方法 D 得到的结果, 包括底部剪力、顶点位移和最大层间位移角离散性均较小, 方法 A 和方法 D 的结构响应参数指标的变异系数在 10%左

右, 而方法 B 的结构响应参数指标的变异系数在 15%左右,方法 C 的 YKJ01 和 YKJ02 结构响应参数指标的变异系数分别在 15%和 10%左右。

由表 7 罕遇地震作用下结构动力响应可以看出方法 C 和方法 D 得到的结果离散性较小. 方法 C 和方法 D 的结构响应参数指标的变异系数在 15%左右,而方法 A 和方法 B 的结构响应参数指标的变异系数在 20%左右,且结构已进入弹塑性阶段,构件刚度退化导致结构基本周期变长,所以方法 A 不适用于弹塑性时程分析的地震动选择过程。

由表 6 多遇地震和表 7 罕遇地震作用下各种方法计算结果响应参数平均值之间的差值均在 10%左右,表明 4 种地震动选择方法计算结果的结构响应具有较好的准确性和一致性。

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[4]:弹性时程分析时,多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%.由结构弹性底部剪力对比结果(见表 8 和图 10)可以看出 4 种选波方法都能很好的满足规范要求,其中依照方法 B 和方法 D 选波的结构弹性底部剪力计算结果与振型分解反应谱法对底部剪力的计算结果更加接近,误差值均在 2%左右,更加符合设计水准。

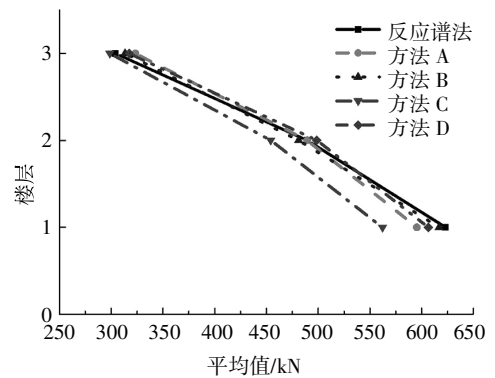
最大层间位移角作为结构弹塑性分析响应的重要参数,在罕遇地震作用下要求钢筋混凝土框架层间位移角限值为 1/50. 本文 4 种方法选出的地震动对结构进行弹塑性动力时程分析,其结果见图 11. 对于 YKJ01 和 YKJ02 结构,目标反应的最薄弱楼层分别出现在第 1 和第 2 层,最大层间位移角的平均值分别约为 1/110 和 1/125,均满足最大层间位移角的限值要求。

表 8 结构弹性底部剪力对比

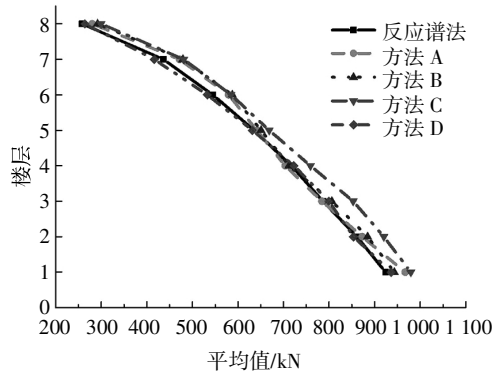
Tab.8 Base shear force comparison with structural elastic

结构编号	YKJ01 底部剪力/kN	YKJ02 底部剪力/kN
反应谱法	623.197	924.170
方法 A	595.467(-0.045)	966.978(0.046)
方法 B	616.878(-0.010)	943.195(0.021)
方法 C	562.229(-0.098)	979.509(0.060)
方法 D	606.612(-0.027)	936.101(0.013)

注:括号内为各方法底部剪力与振型分解反应谱法的误差值。

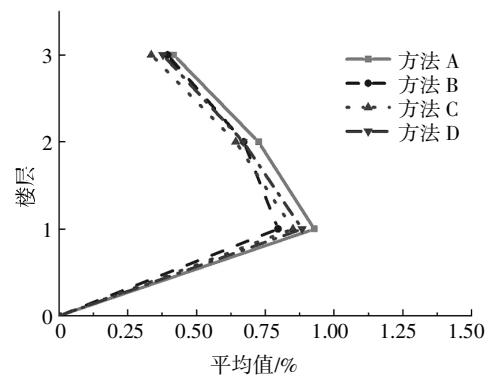


(a)YKJ01 最大楼层剪力值

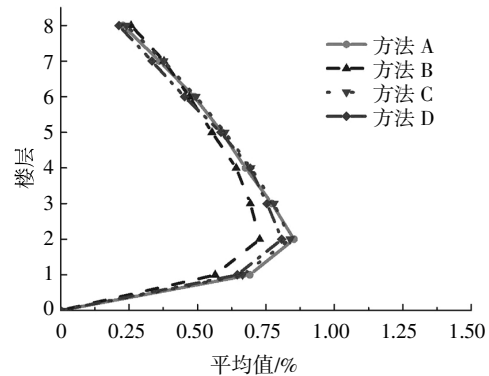


(b)YKJ02 最大楼层剪力值

图 10 结构弹性最大楼层剪力值
Fig.10 Maximum floor shear value of elastic structure



(a)YKJ01 最大层间位移角



(b)YKJ02 最大层间位移角

图 11 结构弹塑性最大层间位移角

Fig.11 Maximum inter-story drift ratio of elastoplastic structure

4 结论

本文通过改进现有的和声搜索法进行地震动的选取,针对依据我国现规范设计的两幅不同周期的PC框架结构在OpenSees中进行了动力时程分析,并与其他3种常用的选波方法的计算结果进行对比,所得到的主要结论如下:

1)多遇地震作用下,周期点法和改进的和声搜索法的结构响应参数的离散性更小,其变异系数在10%左右;通过底部剪力的对比,双频段法和改进的和声搜索法得到的计算结果与振型分解反应谱法的结果更接近,误差值均在2%左右,更符合规范设计水准。

2)罕遇地震作用下,面积法和改进的和声搜索法的结构响应参数的离散性更小,其变异系数在15%左右;且周期点法计算结果离散性最大,结构响应参数在25%左右,适用性较差。

3)周期点法只适用于弹性时程分析的地震动选择过程;双频段法没有较严格的控制结构周期点处的反应谱差值,与结构特性匹配程度不足;面积法是对反应谱围成的面积进行匹配,容易出现反应谱明显偏离目标谱的现象;改进的和声搜索法不仅对结构基本周期点处反应谱进行匹配,还对其周期点一定范围内进行较好的匹配,所以该方法无论是对弹性时程分析还是弹塑性时程分析都适用,离散性较小且很好的满足规范的设计水准。因此,本文提出的改进的和声搜索法能更好的满足地震动选择要求。

参考文献

- [1] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:31—47.
GB 50011—2010 Code for seismic design of building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 31—47. (In Chinese)
- [2] 赵东升. 时程分析方法的几点思考 [J]. 长春工程学院学报, 2006, 7(1): 22—24.
ZHAO D S. Thoughts on time-history analysis method [J]. Journal of Changchun Institute of Technology, 2006, 7 (1): 22—24. (In Chinese)
- [3] NAU J M, HALL W J. Scaling methods for Earthquake response spectra [J]. Journal of Structural Engineering (ASCE), 1984, 110 (7): 1533—1548.
- [4] NAEIM F, ALIMORADI A, PEZESHK S. Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20(2): 413—426.
- [5] NIRMAL J, LIN T, BAKER J W. A Computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance [J]. Earthquake Spectra, 2011, 27 (3): 797—815.
- [6] KAYHAN H A, KORKMAZ A K, IRFANOGLU A. Selecting and scaling real ground motion records using harmony search algorithm [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31 (7): 941—953.
- [7] 王亚勇, 刘小弟, 程民宪. 建筑结构时程分析法输入地震波的研究[J]. 建筑结构学报, 1991, 12(2): 51—60.
WANG Y Y, LIU X D, CHEN M X. Study on input seismic wave of building structure time-history analysis method [J]. Journal of Building Structures, 1991, 12(2): 51—60. (In Chinese)
- [8] 王亚勇, 程民宪, 刘小弟. 结构抗震时程分析法输入地震记录的选择方法及其应用[J]. 建筑结构, 1992, 1(5): 3—7.
WANG Y Y, CHEN M X, LIU X D. Selection method of input seismic record for seismic response time-history analysis and its application [J]. Building Structure, 1992, 1(5): 3—7. (In Chinese)
- [9] 杨溥, 李英民, 赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 33—37.
YANG P, LI Y M, LAI M. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 33—37. (In Chinese)
- [10] 高炳鹏, 周颖. 基于谱面积的输入地震加速度时程选择方法研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(3): 105—111.
GAO B P, ZHOU Y. Methods of ground motion selection based on the spectrum area [J]. Structural Engineers, 2014, 30(3): 105—111. (In Chinese)
- [11] 张耀庭, 刘昌芳, 王晓伟. 结构非线性时程分析中的地震动参数选择[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(4): 153—162.
ZHANG Y T, LIU C F, WANG X W. Parameter selection of ground motion in nonlinear time-history analysis of structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(4): 153—162. (In Chinese)
- [12] 黄丹. 基于规范条件下地震动选择与调整的评估 [D]. 武汉: 华中科技大学土木工程与力学学院, 2015: 32—38.
HUANG D. The evaluation of code-based selection and scaling of ground motions [D]. Wuhan: School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, 2015: 32—38. (In Chinese)
- [13] 韩红燕, 潘全科, 梁静. 改进的和声搜索算法在函数优化中的应用[J]. 计算机工程, 2010, 36(13): 245—247.
HAN H Y, PAN Q K, LIANG J. Application of improved harmony search algorithm in function optimization [J]. Computer Engineer-

- ing. 2010, 36(13):245—247. (In Chinese)
- [14] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search [J]. *Simulation*, 2001, 76(2): 60—68.
- [15] LEE K S, GEEM Z W, LEE S, *et al.* The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization [J]. *Engineering Optimization*, 2005, 37(7):663—684.
- [16] DEGERTEKIN S O. Harmony search algorithm for optimum design of steel frame structures: A comparative study with other optimization methods [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2008, 29(4):391—410.
- [17] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010:141—201.
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2010:141—201. (In Chinese)
- [18] JGJ 140—2004 预应力混凝土结构抗震设计规程 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004:17—18.
JGJ 140—2004 Seismic design procedures for prestressed concrete structure [S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2004:17—18. (In Chinese)
- [19] 郑福聪, 郭宗明, 张耀庭. 近场脉冲型地震作用下 PC 框架结构抗震性能分析[J]. *工程力学*, 2018, 35(增刊1):330—337.
ZHENG F C, GUO Z M, ZHANG Y T. Seismic behavior analysis of prestressed concrete frame structure for near-fault pulsed ground motions [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(S1):330—337. (In Chinese)
- [20] 张耀庭, 杨力, 张江. 预应力混凝土框架结构“强柱弱梁”设计方法研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(1):65—76.
ZHANG Y T, YANG L, ZHANG J. Research on the design method of strong column and weak girder of prestressed concrete frame [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2017, 44(1):65—76. (In Chinese)
- [21] 张耀庭, 卢怡思, 杜晓菊, 等. 柱端弯矩增大系数对 PC 框架结构抗震性能影响的研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(11):37—47.
ZHANG Y T, LU Y S, DU X J, *et al.* Study on the effects of moment magnifying coefficients at column ends on the seismic capacity of prestressed concrete frame [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2014, 41(11):37—47. (In Chinese)