

文章编号:1007-6069(2017)01-0075-09

两次地震作用下 RC 框架结构抗震能力分析研究方法研究

杜云霞¹, 公茂盛¹, 谢礼立^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:为研究钢筋混凝土(RC)框架结构在两次地震作用下的抗震能力,给出了一种考虑两次地震作用的结构分析方法。首先采用动力时程分析,得到第一次地震作用下结构的顶点位移,并将其作为目标位移;然后采用静力往复加载方式对结构加载到该目标位移并卸载到零,然后反向加载到结构能力极限(即结构倒塌时的顶点位移),并对反向加载曲线进行坐标变换作为结构经历一次地震后的能力曲线,用此能力曲线对结构进行 Pushover 分析,得到结构经历两次地震后的损伤状态与抗震能力。利用所提方法对某3层典型 RC 框架结构进行分析,得到了其在两次地震作用下的抗震能力曲线与损伤状态。结果表明:连续两次地震作用下,RC 框架结构损伤累积效应明显,与单次地震作用相比,其损伤水平提高较大,对本文结构来说提高约30%。因此,目前仅考虑单次地震的设计理论与方法是不完备和不安全的,建议在设计时提高结构的抗震设防水平。该文方法、结果与结论可供结构抗震设计、结构抗震分析等工作参考。

关键词:动力时程分析; Pushover 分析; 循环往复加载; 累积损伤; 两次地震作用

中图分类号: TU313.3

文献标志码: A

Seismic analysis method of RC frame structure considering the excitations of twice earthquakes

DU Yunxia¹, GONG Maosheng¹, XIE Lili^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To obtain the seismic capacity of reinforced concrete (RC) frame structure under the excitations of twice earthquakes, this paper presents a structural analysis method considering twice earthquake actions. Firstly, the dynamic time history analysis is adopted, and the top displacement of a structure under the first earthquake was got as the target displacement. Then, the structure was reciprocally loaded to the target displacement and unloaded to zero by the static loading method; and the reverse loading was conducted to the structural capacity limit (i. e., the maximum displacement of the structure when the structure collapses). The reverse loading curve was used as the capacity curve of the structure after an earthquake through coordinate transformation, and the pushover analysis of structure was performed. Finally, the damage state and seismic capacity of the structure under the excitations of twice earthquakes were obtained. By using the proposed method, the seismic capacity and damage state of a typical 3-story RC frame structure are obtained. The results show that the damage accumulation effect of RC frame structure

收稿日期:2016-12-21; 修订日期:2017-02-23

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2016A01, 2016A02, 2014B06);国家自然科学基金项目(51678541, 51308516);国家国际科技合作专项项目(2012DFA70810)

作者简介:杜云霞(1987-),女,研究生,主要从事结构抗震能力评估研究. E-mail:duyunxia_1987@163.com

通讯作者:公茂盛(1976-),男,研究员,主要从事地震工程研究. E-mail:gmsheim@163.com

is obvious under continuous twice earthquakes, and the damage level is increased compared with the single earthquake action, and the damage level increases about 30% for the structure used in this paper. Therefore, the design theory about the single earthquake action is not complete. It is suggested that the seismic fortification level of structure should be increased in the design. The method, result and conclusion of this paper can be used as reference for the seismic design and seismic analysis of structures.

Key words: dynamic time-history analysis; pushover analysis; cyclic reciprocal loading; cumulate damage; excitation of twice earthquakes

引言

大量地震统计表明,大多数情况下,每次地震的发生都伴随着前震、主震和余震等地震序列。而国内外目前结构地震反应分析和抗震设计一般只考虑单震情况,即只考虑主震影响。而震害调查显示,多次地震作用下损伤是有累积的,余震对结构的破坏程度影响十分明显,有时甚至是导致建筑物倒塌的主要因素。因此,如何在现有的抗震设计基础上考虑或增加余震对结构的影响,是一个急需要解决的技术问题。20世纪80年代, Mahin^[1]利用 Managua 地震中记录到的主震-余震序列型地震动对非线性单自由度体系(SDOF)进行了研究,指出余震会使结构的延性需求有所提高。我国学者吴开统等^[2]指出工程建设中应注意强余震以及晚期强余震的影响,并着重阐述了强余震的灾害影响和灾害评估。此后国内外学者开始从不同角度出发研究主余震序列型地震动的危害性。欧进萍等^[3-4]对主余震序列型地震动作用下的 RC 结构进行了地震反应分析,对3组缩尺比为1:4的 RC 压弯构件模型先后进行了振动台主余震模拟试验和周期性抗震静力试验,研究了 RC 压弯构件在主余震作用下的反应和损伤特性。温卫平等^[5]等提出一种构造主余震序列型地震动的方法,针对非弹性 SDOF 体系在主余震序列型地震动作用下的反应特点,提出了能够准确衡量主余震序列型地震动累积损伤效应的损伤指数计算方法,并以此为基础分析了非弹性 SDOF 体系的损伤演变时程,结合震害等级进一步分析了主余震序列型地震动的累积损伤效应。武坤芳^[6]选用改进的 Park - Ang 损伤指标来代表抗力和需求,采用 OpenSees 建模得到一个6层的 RC 框架结构,对其开展了主余震序列型地震动作用下的抗震分析,并评估了主余震作用下结构的经济损失情况。目前,有许多学者曾提出两次地震作用下结构分析方法,如马骏驰等^[7-8]通过对结构进行 Pushover 分析和拟静力循环往复加载分析来模拟两次地震对结构的作用,并通过比较结构在两次地震作用下的累积损伤和单震作用下的损伤,得到了不同地震序列组合情况下的等效地震影响系数,得到两次地震作用对建筑物所造成的损伤,结果分析表明接连两次地震对建筑物的累积破坏作用显著。赵金宝^[9]针对6个钢筋混凝土框架结构模型,研究了其在不同主余震组合下的反应规律,采用 Park - Ang 损伤指数模型研究了结构的损伤情况,指出余震会增大结构的损伤程度,且结构薄弱层的损伤增大程度要大于其它楼层。尽管如此,针对具体结构,如何确定两次地震作用下的结构抗震能力,或确定结构在两次地震作用下的损伤累积水平,目前来看,仍缺乏有效可行的分析方法。

鉴于此,本文将动力时程分析、静力循环往复加载分析与 Pushover 分析方法相结合,给出了一种考虑两次地震作用的结构抗震性能分析方法,并以某典型3层 RC 框架结构为例,讨论了结构在两次地震作用下的抗震性能,得到了一些较为实用的结论。本文结果与结论可供结构抗震设计、结构抗震分析等工作参考。

1 分析方法与计算步骤

1.1 分析方法

目前,结构抗震设计分析方法有静力分析方法(弹性设计方法,有底部剪力法和振型分解反应谱法)、弹塑性静力分析方法(Pushover)及动力时程分析方法。其中静力分析方法不能够反映地震荷载作用下结构的各种动力特性;底部剪力法和振型分解反应谱法(属于弹性设计方法)没有考虑结构的弹塑性特征;Pushover 方法能够考虑结构的弹塑性特性,原理简单,计算方便,工作量较小且精度相对能够满足工程需求,应用更加广泛;动力时程分析方法在输入地震动、恢复力模型和屈服关系模型的确定上,存在许多不确定因素,且计算复杂,工作量大,但能反映动力作用下的反应过程。

从前人研究中可以看出,两次地震作用考虑方式是在单次地震分析方法基础上得来的,即 Pushover 方法与时程分析方法的不同组合,一是两次 Pushover 分析方法^[7],二是通过构造序列型地震动的动力时程分析方法^[9]。前者是一种静力等效方法,简单易懂,方便计算,但没有考虑地震动的不确定性;后者在构造序列型地震动时,不同学者提出了不同构造方法,导致结果具有差异性。

本文在考虑结构经历第 1 次地震作用时,采用动力时程分析法得到结构的损伤情况,然后采用加载-卸载-反向加载分析,得到经历 1 次地震作用后有损伤结构的能力曲线,最后采用能力谱分析方法得到结构在第 2 次地震作用下的损伤情况,完成结构经历两次地震作用的计算分析。与前人分析方法相比,本文所提方法既考虑了地震动的影响,又考虑了能力谱方法优点,所得结果较为可靠。

对结构进行 Pushover 分析得到能力曲线之后,还需要确定需求曲线才能计算性态点。如果结构反应进入非线性阶段,还需要计算非弹性需求曲线,此时一般采用等效阻尼或强度折减模型求得非弹性需求曲线。早期一般采用等效阻尼折减,但这种方法不可靠,有时计算结果不收敛,与动力时程计算结果相差甚远^[10]。为解决这一问题,1999 年加州伯克利分校的 Chopra 教授提出了改进能力谱方法^[11],此方法中采用了强度折减系数来考虑结构的非线性反应,结果有很好的精度。而此时国内外对强度折减系数已经进行了比较广泛的研究,提出了不同的强度折减系数表达式。许圣洁^[12]已对 6 种典型的强度折减系数模型进行了对比,并得出结论:不同的强度折减系数的总体变化规律是一致的,周期较小时与周期成正比,当周期增大至某一值后,将趋于稳定,甚至有一定程度的减小;与结构的延性系数成正比。这里给出了最常用的 3 种强度折减系数模型(Vidic 模型^[13]、范立础模型^[14]和翟长海模型^[15])对比情况,如图 1 所示。因为强度折减系数与结构的延性系数成正比,因此这里只给出了 $\mu=2$ 时的强度折减系数,根据 3 种强度折减系数变化规律,本文选取中间值,即 Vidic 模型,进行后续的计算与分析。

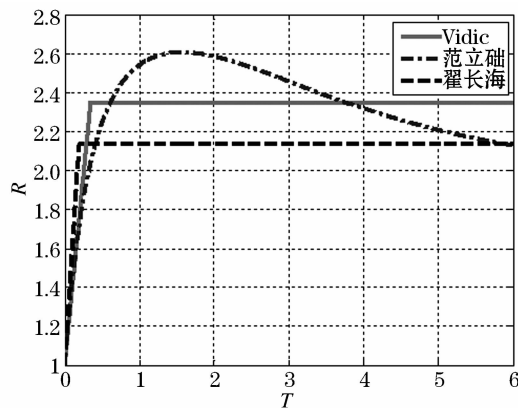


图 1 Vidic、范立础和翟长海强度折减系数模型对比($\mu=2$)

Fig. 1 Comparison of strength reduction coefficient models of Vidic, Fan Lichu and Zhai Changhai($\mu=2$)

1.2 计算步骤

本文所采用的是动力时程分析与 Pushover 分析相结合的结构抗震分析方法,其中的关键点是:第 1 次地震作用后的最大顶点位移,损伤后的能力曲线以及 Pushover 分析中强度折减系数模型的选取。具体分析步骤如下,计算流程如图 2 所示:

(1) 对于结构进行建模,输入已知的第 1 次地震动进行动力时程分析,得到层间侧移、最大顶点位移和残余变形,通过层间位移角来判断结构的损伤状态。

(2) 通过加载-卸载-反向加载分析,正向加载到步骤(1)中得到的最大顶点位移,然后卸载到零,继续反向加载直到结构破坏,把反向加载曲线通过坐标变化作为第 2 次地震作用的 Pushover 曲线。

(3) 根据下列式(1)、式(2)把 Pushover 曲线(即基底剪力(V_b)-顶点位移(u_N)曲线)转化为谱加速度(A)-谱位移(D)曲线。

$$D = \frac{u_N}{\Gamma_1 \phi_{N1}} \quad (1)$$

$$A = \frac{V_b}{M_1^*} \quad (2)$$

其中, $\Gamma_1 = (\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}) / (\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}^2)$ 是第 1 振型参与系数; $M_1^* = (\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1})^2 / (\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}^2)$ 是第 1 振型有效质量; m_j : 结构在第 j 层的质量; ϕ_{j1} : 第 1 振型 ϕ_1 第 j 层的元素; ϕ_{N1} : 第 1 振型 ϕ_1 在结构顶层(第 N 层)的元素; N : 结构的总层数。

(4) 把谱加速度(A) - 谱位移(D)曲线根据等面积原理双折线化得到等效的屈服剪力和屈服位移。

(5) 根据抗震设计反应谱得到单自由度下的弹性加速度反应谱, 选用 Vidic 提出的 $R_y - \mu - T_n$ 强度折减系数模型得到不同延性系数下的塑性需求谱。

(6) 叠加单自由度弹塑性的能力谱和需求谱, 全部为 $A - D$ 格式, 得到结构抗震能力。

(7) 通过步骤(1)和步骤(6)结果的叠加, 得到结构在两次地震作用下损伤情况及抗震能力。

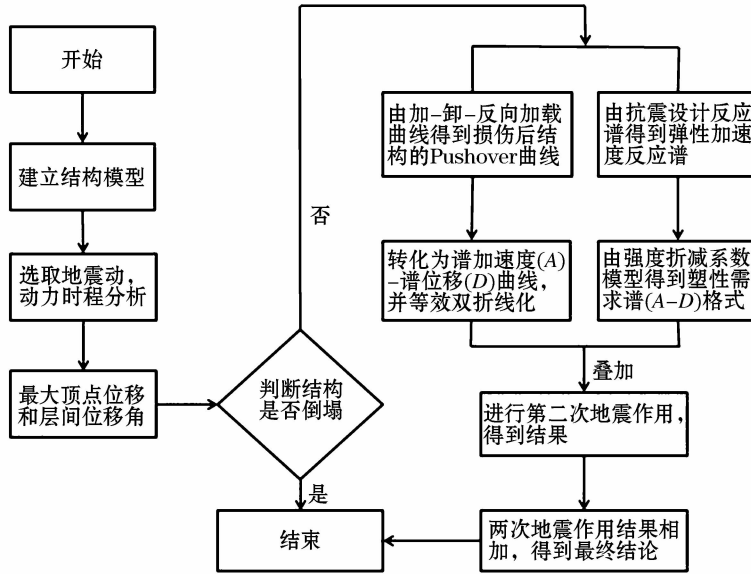


图 2 计算流程图

Fig. 2 Flow-chart for calculation

2 计算实例

2.1 结构模型

本文严格按照我国规范, 设计了一个 3 层 RC 框架结构作为算例, 如图 3 所示, 结构为平面、立面规则结构, 柱截面尺寸 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$, 梁截面尺寸 $250 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$, 混凝土等级为 C25, 箍筋为 $10@100$ 。3 跨结构, 边跨 6 m, 中跨 3 m, 各层层高均为 3.3 m。结构设计标准为 7 度 (0.1 g)、II 类场地、设计地震动分组为第 1 组。经初步计算分析, 结构第 1 周期为 0.40 s, 第 1 振型为 $(0.303, 0.725, 1)$, 第 1 振型的参与系数为 1.264 9, 第 1 振型的有效质量为 234 750 kg。上述结构考虑经历两次地震作用时, 选取主余震类型, 且主震为大震, 因此选用第 1 次地震 $\text{PGA} = 0.2 \text{ g}$, 体现在所选地震记录峰值调整为 0.2 g , 第 2 次地震 $\text{PGA} = 0.1 \text{ g}$, 根据公式 $\alpha = \alpha_{\max} g / \beta$, 其中 $\alpha_{\max} g$ 代表了结构对地震作用的反应情况, $\beta = 2.25$ 为放大系数^[16], α 为地面水平运动的加速度峰值, 在此处为 0.1 g 。因此求得规范中弹性标准反应谱中的水平地震影响系数的最大值 α_{\max} , 体现在 Pushover 分析中的需求曲线上, 来计算结构所遭受的损伤。

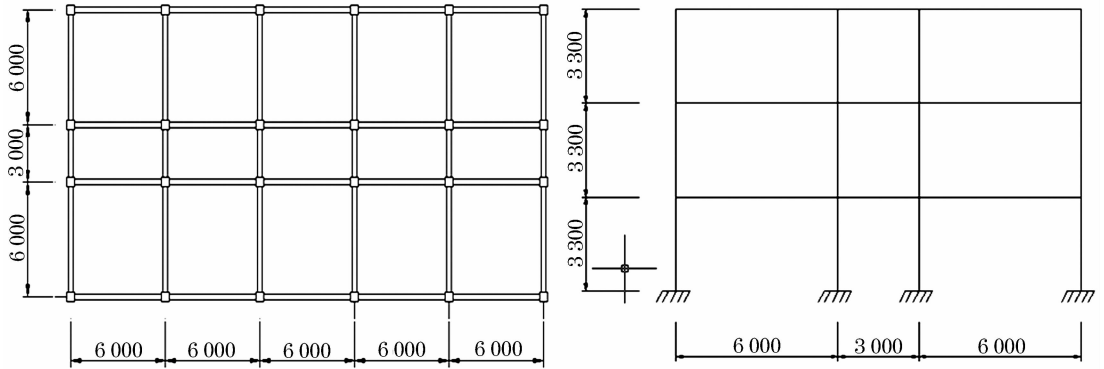


图 3 结构立面平面布置图

Fig. 3 Structure plane and elevation layout

2.2 计算结果

第 1 次地震作用:选取 II 类场地的 10 条地震动记录,并把峰值调整到 $0.2g$,如图 4 所示,然后对模型进行动力时程分析,记录结构顶层最大位移,计算结果见表 1 所示。我国 2010 版抗震设计规范规定:当取 7 组及 7 组以上的时程曲线时,计算结果取时程分析结果的平均值,因为从表 1 中可以看出不同地震动对结构的影响差异性很大,例如最大顶点位移为 125.11 mm ,最小顶点位移为 24.99 mm ,它们之间相差 5 倍,所以为反映地震动的平均影响水平,本文按取平均值考虑,即结构顶层最大位移取为 61.32 mm (表 1)。

表 1 动力时程分析结果

Table 1 Results of dynamic time history analysis

Record ID	最大顶点 位移/mm	第 1 层层间 位移角/ 10^{-3}	第 2 层层间 位移角/ 10^{-3}	第 3 层层间 位移角/ 10^{-3}	残余变形 /mm
1	60.26	6.97	6.95	4.34	41.47
2	24.99	3.15	2.75	1.68	6.92
3	31.41	3.88	3.42	2.23	1.57
4	73.47	8.68	8.67	4.92	7.21
5	52.12	6.44	6.09	3.27	15.98
6	34.47	3.82	4.04	2.59	18.37
7	49.49	6.59	5.31	3.10	2.15
8	125.11	1.48	1.41	9.05	0.07
9	107.89	1.44	1.22	6.02	47.20
10	53.94	7.35	5.90	3.09	0.77
平均值	61.32	7.61	6.94	4.03	14.17

第 2 次地震作用:通过第 1.2 节中的步骤(2)得到损伤(经历第 1 次地震作用)后结构的能力曲线,通过正向加载卸载然后反向加载,即图 5 中 3、4 象限的曲线经过坐标变换得到损伤后结构的 Pushover 曲线,即图 6;选用 Vidic 提出的 $R_y - \mu - T_n$ 强度折减系数模型(图 7)得到不同延性系数下的塑性需求谱(图 8),图 9 为损伤前后结构的能力曲线。把图 8 中需求谱和图 9 中结构经历 $PGA = 0.2g$ 作用后带损伤结构的能力谱双线性化后画到同一张图上,如图 10 所示,进一步得到结构性态点。

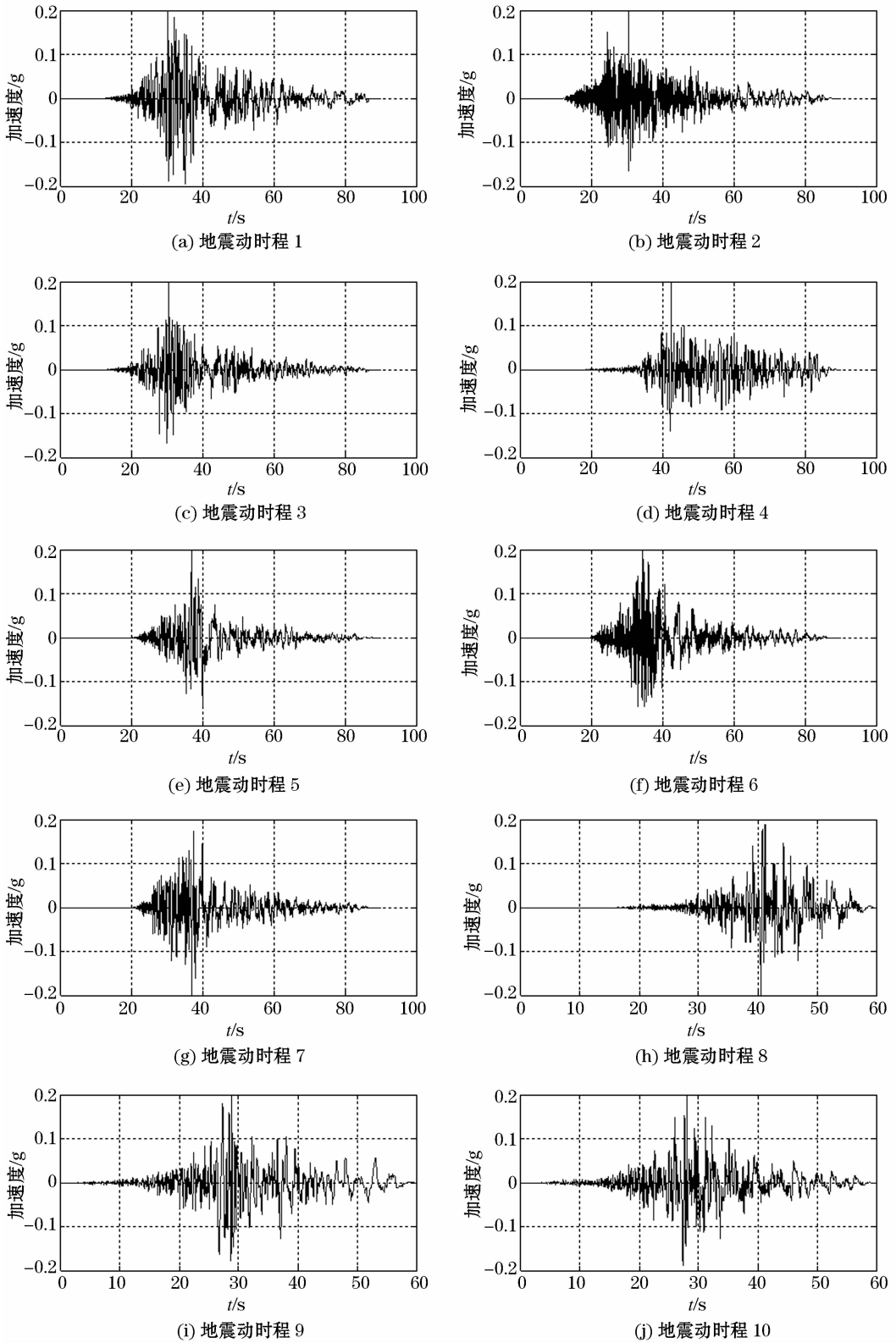


图4 地震动记录

Fig. 4 Strong ground motions used in the paper

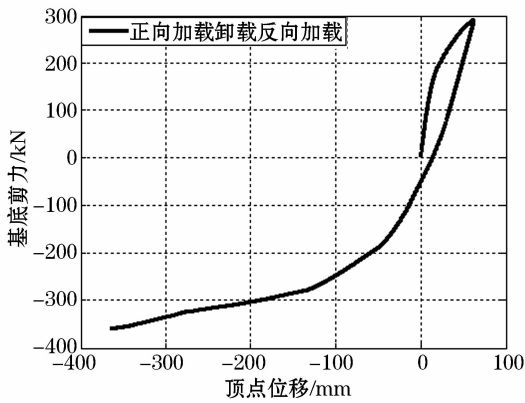


图 5 循环往复加载正向加载卸载反向加载曲线
Fig. 5 Loading, unloading and reverse loading curve in cyclic reciprocal loading

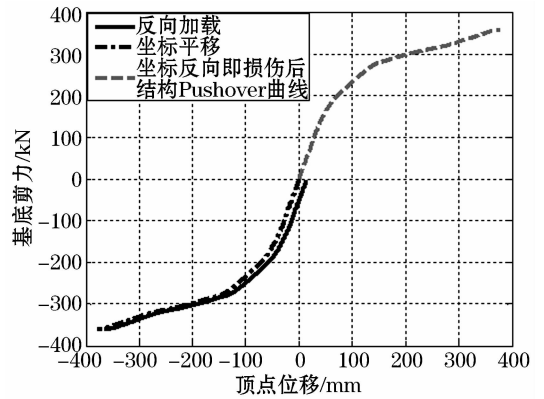


图 6 坐标变换
Fig. 6 Coordinate transformation

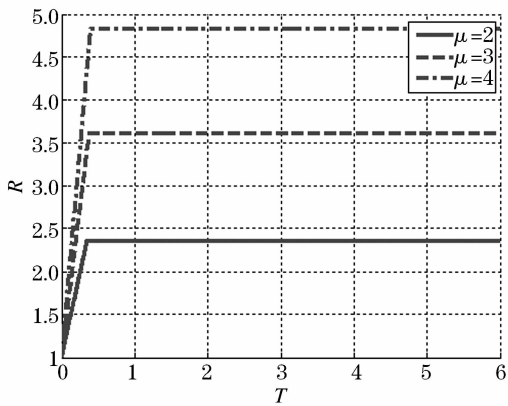


图 7 Vidic 强度折减系数模型
Fig. 7 Vidic's strength reduction coefficient model

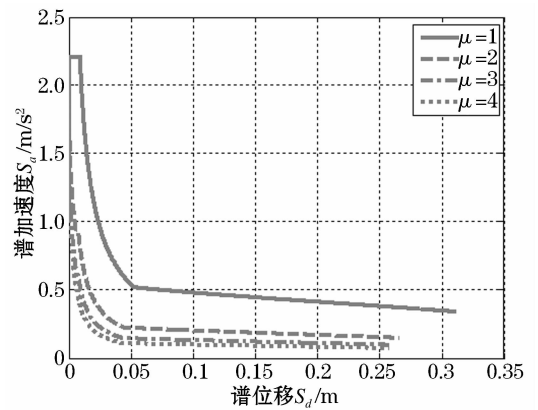


图 8 弹塑性需求谱
Fig. 8 Elastoplastic demand spectrum

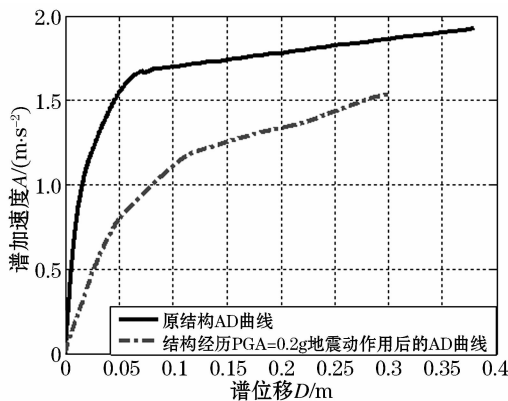


图 9 结构损伤前后两次能力曲线对比
Fig. 9 Comparison of two capacity curves of structure before and after damage

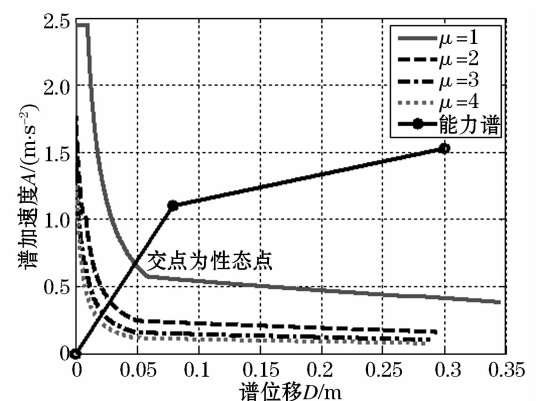


图 10 根据能力谱与需求谱求性态点
Fig. 10 Calculation of the characteristic points according to the capacity spectrum and demand spectrum

2.3 结果分析

首先分析第 1 次地震作用的时程分析结果,由表 1 可知,10 条地震动作用下的结构最大顶点位移的平均值为 61.32 mm,结构各层的层间位移角分别为 7.61×10^{-3} , 6.94×10^{-3} , 4.03×10^{-3} ,可以用分数表示为 1/131, 1/144, 1/248,根据 Lin 等^[17]关于 RC 结构各个破坏等级与层间位移角之间的关系研究(表 2 所示),

可知结构各层分别处于中等破坏,中等破坏,轻微破坏。而结构整体破坏标准一般选用结构的薄弱层来判断结构所处状态,结构的最大层间位移角为 $1/131$,结构的薄弱层为第1层,即结构在第1次地震作用下处于中等破坏状态。

由表1可知第1次地震作用后,结构的残余变形为 14.17 mm ;第2次地震作用时,结构的性态点坐标由图10可求,对本结构而言,可以求得能力谱与需求谱交点为 $(0.0478\text{ m}, 0.6622\text{ m/s}^2)$,即等效单自由度目标位移为 0.0478 m ,由式(1),可计算得原结构的顶点位移为 0.0605 m ,即第2次地震作用后结构顶点位移为 60.5 mm ;第2次地震作用后结构顶点位移加上第1次地震作用后的残余变形,即两次地震作用后结构的最终顶点位移,为 74.67 mm 。经综合计算两次地震作用下的反应结果,可以得到结构最终各层层间侧移,分别为 32.69 mm 、 28.35 mm 、 13.64 mm ,对应的层间位移角分别为 $1/101$ 、 $1/116$ 、 $1/242$,结构各层分别处于中等破坏,中等破坏,轻微破坏。此时结构最大层间位移角为 $1/101$,结构的薄弱层为第1层,此时结构处于中等破坏状态与严重破坏状态的交界处,即将进入严重破坏状态,破坏程度比单次地震作用更加严重,如果根据层间位移角考虑,结构在两次地震作用下比单次地震作用下的结果加重了 30% 。因此,考虑两次地震作用时,累积破坏现象十分明显。

表2 RC结构各个破坏等级与层间位移角之间的关系^[17]

Table 2 Relationship between the failure level of the RC structures and inter-story displacement angle^[17]

破坏等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
层间位移角	$0 \sim 1/550$	$1/550 \sim 1/200$	$1/200 \sim 1/100$	$1/100 \sim 1/50$	$1/50$

3 结论

本文将动力时程分析、静力往复加载分析与 Pushover 分析方法相结合,给出了一种考虑两次地震作用的结构分析方法,并对某3层典型RC框架结构进行了分析,所得结论如下:

(1)不同地震动作用对结构反应影响很大,从本文选取的地震动来看,最大可差5倍,因此,在结构动力弹塑性时程分析时如何选取合理地震动作为输入,需要单独研究。

(2)考虑两次地震作用,结构的累积破坏现象十分明显,本文算例中尽管第2次地震作用较小,但结构破坏还是比单次地震作用加重了 30% ,因此,在结构抗震分析或设计时,只考虑1次地震作用是不完善和不安全的,建议通过提高设防地震水平或实际分析来考虑两次地震作用。

(3)从方法角度考虑,在分析和确定RC框架结构在两次地震作用下的抗震性能时,如果既有考虑精度的要求,又要考虑地震动的不确定性因素影响,建议采用与本文类似的动力时程分析与 Pushover 分析相结合的方法。

参考文献

- [1] MAHIN SA. Effects of duration and aftershocks on inelastic design earthquakes [C]. In: Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, 1980, 5: 677-679.
- [2] 吴开统, 焦远碧. 强震序列对工程建设的影响 [J]. 地震学刊, 1987, 9(3): 1-11.
WU Kaitong, JIAO Yuanbi. Influence of strong earthquake sequence on engineering construction [J]. Journal of Seismology, 1987, 9(3): 1-11. (in Chinese)
- [3] 欧进萍, 吴波. 压弯构件在主余震作用下的累积损伤试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(3): 20-29.
OU Jinping, WU Bo. Experimental study on cumulative damage in the main columns under the action of main shock-aftershock [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(3): 20-29. (in Chinese)
- [4] 欧进萍, 吴波. 有损伤压弯构件的恢复力试验研究及其应用 [J]. 建筑结构学报, 1995, 16(6): 21-29.
OU Jinping, WU Bo. Experimental research on restoring force of damaged compression-flexure members and its applications [J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(6): 21-29.
- [5] 温卫平. 基于主余震序列型地震动损伤谱研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
WEN Weiping. Damage spectra based on main shock-aftershock sequence-type ground motions [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [6] 武坤芳. 基于主余震序列型地震动的RC框架结构易损性分析及应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
WU Kunfang. The fragility analysis and application of RC frame structure based on main shock-aftershock sequence-type ground motions [D].

- Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] 马骏驰, 窦远明, 等. 考虑接连两次地震影响的建筑物震害分析方法 [J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(1): 59–62.
MA Junchi, DOU Yuanming, et al. Seismic analysis method considering damage to structure subjected to two earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(1): 59–62. (in Chinese)
- [8] 马骏驰, 苏经宇, 等. 考虑接连两次地震影响的群体建筑物震害预测方法 [J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(5): 91–94.
MA Junchi, SU Jingyu, et al. Seismic analysis method considering damage to structure subjected to two earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(5): 91–94. (in Chinese)
- [9] 赵金宝. 主余震作用下钢筋混凝土框架结构的破坏评估 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2005.
ZHAO Jinbao. Damage assessment of reinforced concrete frame structures under principal aftershocks [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2005. (in Chinese)
- [10] 毛建猛. Pushover 方法的改进研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008.
MAO Jianmeng. Studies on and improvements in pushover analysis [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese)
- [11] CHOPRA AK and GOEL RK. Capacity-demand-diagram methods based on Inelastic design Spectrum [J]. Earthquake Spectra, 1999, 15(4): 636–656.
- [12] 许圣洁. 两次地震作用下 RC 框架结构抗震性能分析及方法研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2015.
XU Shengjie. Study on analytical method of seismic capacity of RC frame structure considering two times earthquake [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2015. (in Chinese)
- [13] VIDIC T, FAJFAR P and FISCHINGER M. Consistent inelastic design spectra; strength and displacement [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23(5): 507–521.
- [14] 卓卫东, 范立础. 结构抗震设计中的强度折减系数研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(1): 84–88.
ZHUO Weidong, FAN Lichu. On strength reduction factors used for seismic design of structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 84–88. (in Chinese)
- [15] 翟长海, 谢礼立. 考虑设计地震分组的强度折减系数的研究 [J]. 地震学报, 2006, 28(3): 285–294.
ZHAI Changhai, XIE Lili. Study on strength reduction factors considering the effect of classification of design earthquake effect [J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28(3): 285–294. (in Chinese)
- [16] 建筑抗震设计规范(GB50011–2010)[S]. 中华人民共和国国家标准, 2010.
Code for Seismic Design of Building (GB50011–2010) [S]. National Standards of the People's Republic of China, 2010. (in Chinese)
- [17] LIN Shibin, XIE Lili, GONG Maosheng, et al. Performance-based methodology for assessing seismic vulnerability and capacity of buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(2): 157–165.