

文章编号: 1000-5013(2007)02-0188-04

一种改进的结构推覆分析目标位移计算方法

吴毅彬, 杜培龙, 郭子雄

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 在等效单自由度体系地震反应目标位移计算方法的基础上, 提出考虑高振型影响的结构推覆分析目标位移计算方法. 利用该方法和其他常用推覆分析方法, 进行不同层数的钢筋混凝土规则框架结构推覆分析, 并与地震反应非线性时程分析结果进行比较和分析. 结果表明, 所提出的改进方法能够较好地考虑结构地震反应中高阶振型的影响.

关键词: 地震反应; 目标位移; 高振型; 推覆分析; 动力时程分析

中图分类号: TU 973⁺. 23; TU 973⁺. 31

文献标识码: A

根据结构动力学原理, 能够方便地把一个多自由度体系转化为按某一振型向量振动的单自由度体系^[1-4], 进而基于等效单自由度体系, 利用时程分析或反应谱法, 确定推覆分析的目标位移. 这种目前地震反应推覆分析中确定目标位移的常用方法, 仍存在以下几点问题. (1) 该方法假定结构的位移形状向量为结构的第1振型, 且以该振型在地震反应过程中保持不变为前提. (2) 结构在地震作用下的弹性和弹塑性阶段, 都采用第1振型形状向量进行多自由度和单自由度体系的位移转化. 这种假定对地震反应以第1振型为主的规则结构比较适用. 对于层数较高的高层结构或不规则结构, 由于高振型影响较为明显, 各阶振型在地震作用过程中随着结构刚度的改变而改变, 上述等效单自由度体系法没有考虑高阶振型对目标位移的影响, 制约着该方法在高层结构或不规则结构工程中的推广和应用. 为了扩大 Push-over 分析方法的适用范围, 本文在等效单自由度体系目标位移计算方法基础上, 提出一种能够考虑高振型影响的目标位移计算方法, 使得推覆分析方法能够适用于高振型影响较明显的结构.

1 目标位移计算方法的改进

对于一个多自由度弹性体系, 为了便于讨论实际地震反应与只考虑第1振型的等效单自由度体系地震反应的差异, 引入地震反应振型修正系数 β , 即 $\beta = \Delta_n / \Delta_1$. 其中, Δ_n 为设计地震作用下, 考虑 n 个振型影响的结构顶点最大弹性位移; Δ_1 为仅考虑第1振型的结构顶点最大弹性位移.

在弹性反应阶段, 结构的刚度和振型保持不变. 但推覆分析的主要目标是, 分析结构在罕遇地震作用下的弹塑性性能. 在地震作用过程中, 结构的弹塑性地震反应较为复杂, 随着结构塑性的发展, 结构的振型也在不断发生改变. 显然, 利用弹塑性时程分析法直接计算一个原型结构在设计地震下的弹塑性反应最为准确, 但由于其分析过程过于繁杂, 才使得简化的推覆分析得到地震工程界的广泛认同. 那么, 如何在简化方法中考虑地震作用下多振型的影响, 以使推覆分析方法能够具有更广泛的应用范围, 一直是推覆分析方法研究领域倍受关注的问题. 我们认为, 作为简化方法, 可以考虑以弹性体系的地震反应振型修正系数来近似相应弹塑性体系的振型修正系数. 即考虑多振型影响的推覆分析目标位移, 可以近似按以下公式确定, $\Delta = \beta \cdot \Delta'$. 其中, Δ 为设计地震作用下的结构的弹塑性目标位移; Δ' 为仅考虑第1振型的结构最大位移反应, 可以通过等效单自由度体系法确定; β 为地震反应振型修正系数, 可以采用弹性

收稿日期: 2006-12-14

作者简介: 吴毅彬(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事工程抗震防灾的研究; 通讯作者: 郭子雄(1967-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478120); 福建省科技重大专项前期研究项目(2005YZ1017)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

体系的振型分解反应谱法. 对于一般结构, 在弹性阶段的实际地震反应主要以前 3 阶振型为主. 弹性阶段前 3 阶振型组合的地震反应最大值与第 1 振型下结构地震反应最大值之间的比值, 在一定程度上反映了在多个振型下, 结构实际地震反应最大值与第 1 振型地震反应最大值的比例. 基于以上的分析, 本文在以下计算分析中确定地震反应振型修正系数时, 只考虑前 3 阶振型的影响.

在确定设计地震下推覆分析的目标位移 Δ 时, 可以先利用基于第 1 振型的等效单自由度体系法, 计算结构的弹塑性目标位移近似值 Δ' , 确定振型修正系数 β , 从而可以得到修正后的结构目标位移 Δ .

2 计算分析

为了评估基于等效单自由度体系的目标位移计算方法和上述改进方法, 本文采用通用结构分析软件 SAP 2000, 对不同层数的钢筋混凝土框架结构进行弹塑性动力时程分析, 并对每个结构分别按能力谱方法(CapS)、等效位移系数法(EDCM)、等效单自由度体系法(ESDOF)和本文的改进方法(IMP)所确定的目标位移, 分别进行 Pushover 分析. 通过在顶点位移、层位移、层间位移等 3 个层次上对上述方法的分析结果进行对比分析, 以验证所提出的改进方法的有效性.

2.1 结构概况

分别选取 4 层、8 层和 12 层规则钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)框架结构进行分析, 结构平面图如图 1 所示, 3 个算例的梁柱截面尺寸如表 1 所示. 梁柱钢筋混凝土强度等级均为 C30. 楼板采用 100 mm 厚现浇钢筋混凝土板, 外墙采用 240 mm 厚钢筋混凝土空心砌块, 内墙采用 180 mm 厚钢筋混凝土空心砌块. 本工程按 7 度抗震设防(设计基本地震加速度值 $1.47\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), 场地类别为 II 类, 设计地震分组第 2 组, 场地特征周期 0.4 s. 经 PKPM 程序的 TAT 模块分析, 并按照现行规范进行截面配筋设计, 其中底层柱最大配筋率为 3.2%, 最大轴压比为 0.39, 各构件的配筋率及强度等指标均满足规范要求.

结构 X 向的最大层间位移角为 1/578, Y 向的最大层间位移角为 1/631, 均小于规范限值 1/550. 各算例中取图 1 中 ④轴单榀框架进行计算分析.

2.2 分析方法

在通用结构分析软件 SAP 2000 V 8.32 中建立上述结构的有限元分析模型, 梁柱均用杆单元进行模拟. 为简单起见, 分析中采用 SAP 2000 里提供的缺省塑性铰本构模型, 将弯矩塑性铰赋予梁两端, 轴力和弯矩耦合塑性铰赋予柱两端, 并按缺省设置考虑单元刚域^[5]. 对每个分析结构进行一次非线性时程分析, 采用 Hilber-Hughes-Taylor α 法直接积分, 参数 α 设置为 0, 计算中考虑 P-delta 效应. 时程分析所用地震波按照强度(幅值)、频谱特性和持时地震动进行选择 and 调整, 通过对地震波按场地和特征周期 T_g 分类, 考虑地震波频谱特性进行选波^[4]. 分析结构均属于 7 度设防区, 设计的基本地震加速度为 $1.47\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. 按照规范要求, 对所选择的地震波统一调幅, 使其加速度峰值均为 $3.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. 在进行地震动记录的截断时, 按照 90% 能量持时原则, 将所选择的地震动记录统一截断为 20 s, 满足包含地震记录最强部分和 10 倍基本周期的要求^[5]. 图 2 为所选择的 17 条地震动记录拟加速度谱和规范反应谱之间的关系. 由图 2 可见, 本文所选择的地震动记录在统计意义上与规范的反应谱基本相符.

在弹塑性时程分析后, 对每个结构分别按能力谱方法(CapS)、等效位移系数法(EDCM)、等效单自由度体系法(ESDOF)和改进方法(IMP)计算的目标位移, 分别进行 Pushover 分析. 由于分析的结构是

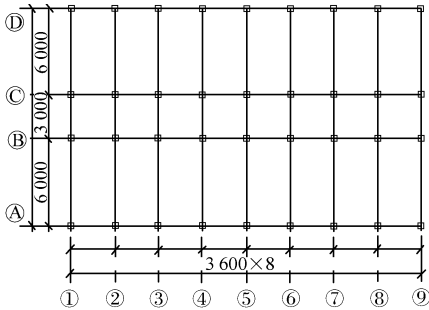


图 1 规则框架平面图 mm
Fig.1 Plan of the regular frames mm

表 1 RC 框架结构梁柱截面尺寸 mm×mm					
Tab.1 Dimensions of beams and columns in RC frame mm×mm					
n	4	8	12		
			1~3 层	4~8 层	9~12 层
柱	400×400	450×450	550×550	500×500	450×450
横向边跨梁	250×650	250×650	250×650	250×650	250×650
中跨梁	250×500	250×500	250×500	250×500	250×500
纵向框架梁	200×400	300×600	300×600	300×600	300×600

规则结构, 推覆分析荷载模式选用倒三角荷载模式.

2.3 计算结果分析

上述 3 种不同层数(n) 框架结构的推覆分析和时程分析得到的层位移(Δ_F), 如图 3 所示. 由于时程分析结果采用的是 17 条地震动时程分析结果的平均值, 且这些地震动在统计意义上与规范反应谱基本一致, 故适合作为比较的标准参照值. 从图 3 可得出 4 点结论. (1) 对 4, 8, 12 层规则 RC 结构, 与等效单自由度体系法相比, 改进方法在目标位移预测值及层位移预测值上与时程分析结果更接近, 改进效果显著. (2) 与其它目标位移计算方法相比, 改进方法在层位移预测值上与时程分析结果最接近. (3) 能力谱方法和等效位移系数法结果偏大, 误差最大的是等效位移系数法, 等效单自由度体系法结果偏小. (4) 8 层和 12 层与 4 层 RC 规则框架结构相比, 目标位移预测误差明显降低, 12 层较 8 层 RC 规则框架结构预测误差相当.

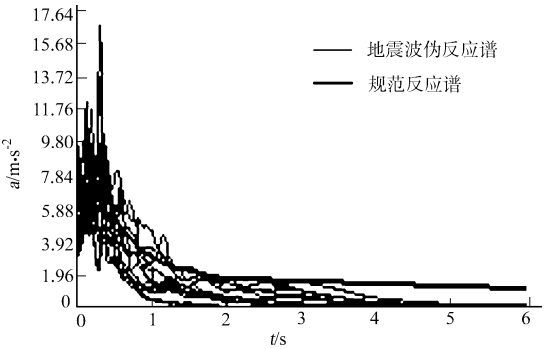


图 2 阻尼比为 5% 的加速度谱

Fig. 2 Acceleration spectra of 5% damping ratio

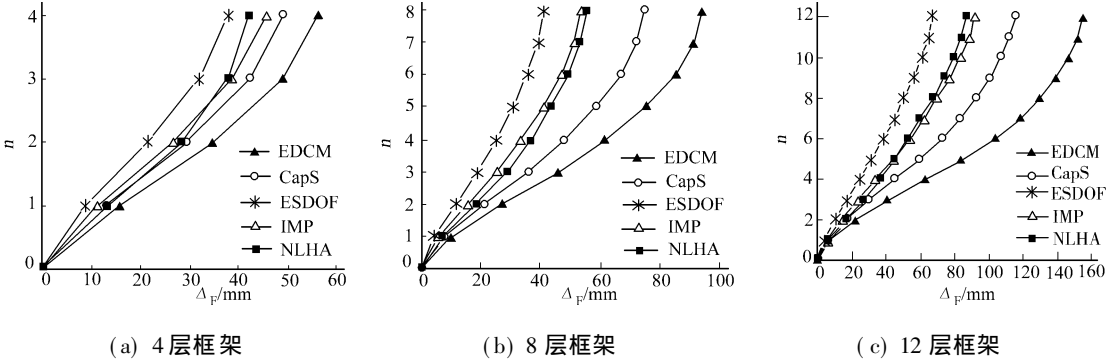


图 3 不同方法层位移计算结果

Fig. 3 Calculation results of storey displacement by different methods

2.4 目标位移预测值比较

为研究随结构层数的增加、高振型影响的增大幅度, 以及各目标位移计算方法的目标位移预测值与时程分析(NLHA) 结果之间的差异, 将 3 个算例的目标位移预测值与时程分析(NLHA) 结果进行比较, 如表 2 所示. 表中, $\Delta_1 \sim \Delta_4$ 分别为 EDCM, CapS, ESDOF 和 IMP 等 4 种推覆分析方法求解的目标位

表 2 不同目标位移计算方法与时程分析结果的比较

Tab. 2 Comparison between the results of different pushover methods and time history method

n	EDCM		CapS		ESDOF		IMP		NLHA
	Δ_1 / mm	Δ_1 / Δ	Δ_2 / mm	Δ_2 / Δ	Δ_3 / mm	Δ_3 / Δ	Δ_4 / mm	Δ_4 / Δ	
4	56.21	1.34	49.18	1.17	38.16	0.91	45.64	1.08	42.07
8	94.44	1.70	75.00	1.35	41.20	0.74	53.64	0.96	55.63
12	155.50	1.78	116.00	1.33	67.20	0.77	91.84	1.05	87.48

移, Δ 为动力时程分析法(NLHA) 计算的最大位移. 从表 2 可以得出 5 个结论. (1) 4 层、8 层和 12 层框架结构等效单自由度体系法 ESDOF 目标位移预测值偏小, 预测误差分别为 9%, 26%, 23%, 8 层和 12 层的预测误差相当, 为 4 层预测误差的 2.5~3 倍. 这说明随着结构层数的增长, 高振型影响的加大, 等效位移系数法 EDCM 目标位移预测值与时程分析结果偏离的程度有加大的趋势, 误差也有增长的趋势. (2) 4 层、8 层和 12 层框架结构改进方法 IMP 的目标位移预测值的预测误差分别为 8%, 4%, 5%, 8 层和 12 层结构的目标位移预测误差相当, 与 4 层结构相比误差降低近一倍. 这说明随着结构层数的增长及高振型影响的加大, 改进方法 IMP 预测值与时程分析 NLHA 分析结果有靠拢的趋势, 目标位移预测值的误差也有减小的趋势. 与等效单自由度体系法 ESDOF 相比, 预测误差大大减小, 这说明改进效果显著, 且随着结构层数的增长, 高振型影响的加大, 改进效果越发明显. (3) 4 层、8 层和 12 层框架结构等效位移系数法 EDCM 目标位移预测值偏大, 且随着层数的增长, 预测值越来越大, 预测误差也越来

越大, 分别为 34%, 70%, 78%, 不可忽略. 这说明随着结构层数的增长, 高振型影响的加大, 等效位移系数法 EDCM 目标位移预测值与时程分析结果偏离的程度越来越大, 误差也越来越大. (4) 4 层、8 层和 12 层框架结构能力谱方法 CapS 目标位移预测值偏大; 预测误差分别为 17%, 26%, 23%, 8 层和 12 层的预测误差相当, 为 4 层预测误差的近 1.5 倍. 这说明随着结构层数的增长, 高振型影响的加大, 等效位移系数法 EDCM 目标位移预测值与时程分析结果偏离的程度有加大的趋势, 误差也有增长的趋势. (5) 与其他目标位移计算方法相比, 目标位移计算改进方法 IMP 的目标位移预测值在 3 个算例中的误差始终最小. 其他 3 种目标位移计算方法的预测误差随着结构层数的增长, 误差有增大的趋势, 而改进方法 IMP 则有减小的趋势. 这说明改进方法 IMP 在计算目标位移时, 能够更好地考虑高振型的影响.

3 结束语

(1) 分析结果表明, 本文在等效单自由度体系目标位移计算方法的基础上, 提出的考虑高振型影响的目标位移改进方法, 能够更好地考虑多高层规则框架结构高振型的影响. (2) 在层位移预测方面, 4 种目标位移计算方法预测结果与 NLHA 分析结果相比, 等效单自由度体系法 ESDOF 预测值偏小; 等效位移系数法 EDCM 的预测值偏离程度最大. 总体上看, 改进方法(IMP)的结果与 NLHA 分析结果最为接近, 能力谱方法 CapS 稍差. (3) 在目标位移预测方面, 与等效单自由度体系法(ESDOF)相比, 改进方法(IMP)的预测结果与时程分析(NLHA)结果更加接近. 与其他推覆分析目标位移计算方法相比, 改进方法(IMP)在 8 层和 12 层的分析结果与时程分析(NLHA)结果吻合得更好. 这说明在规则结构中, 随着高振型影响的加大, 改进方法越来越显示其预测的准确性. (4) 本文的算例主要针对平面规则且层数在 12 层以下的框架结构, 是否适用于更多层数或不规则的框架结构, 还有待进一步研究.

参考文献:

[1] KRAWINKLER H, SENERVIRATNA G D P K. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation[J]. Engineering Structures, 1998, 20(4): 452-464.

[2] SAHDI M, SOZEN M A. Simple nonlinear seismic analysis of R/C structures[J]. Journal of Structural Division (ASCE), 1981, 107(8): 937-952.

[3] 袁 波. 基于位移的结构弹塑性地震反应简化分析方法的研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2004.

[4] 吕西林, 周定松. 考虑场地类别与设计分组的延性需求谱和弹塑性位移反应谱[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(1): 39-48.

[5] 王亚勇. 结构抗震设计时程分析法中地震波的选择[J]. 工程抗震, 1988, 10(4): 15-22.

An Improved Method for Calculating the Target Displacement of Pushover Analysis

WU Yibin, DU Peilong, GUO Zixiong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: An improved method for calculating the target displacement of pushover analysis is proposed based on equivalent single degree of freedom system, which considers the contribution of the higher modes in seismic response. The pushover analysis of RC (reinforced concrete) regular frame structures with 4, 8, and 12 storeys are carried out by this improved method, and other common methods. Comparing the results of this improved method with the results of other pushover analysis methods and nonlinear time history analysis method, it's shown that this improved method can properly consider the contribution of the higher modes in seismic response of the regular frame structure.

Keywords: seismic response; target displacement; higher modes; pushover analysis; dynamic time history analysis

(责任编辑: 黄仲一)