

基于位移模式静力弹塑性分析方法的研究

李 琪¹ 顾荣蓉² 繆志伟³ 王德信¹

(1. 河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098 2. 扬州大学建筑科学与工程学院 ,江苏 扬州 225092 ;
3. 清华大学土木系 ,北京 100084)

摘要 :在基于位移抗震设计中 ,运用静力弹塑性分析方法分析结构在地震作用下的弹塑性性能 .采用基于水平位移模式分析方法 ,克服基于水平力模式分析方法中的理论不足 ,反映结构在地震作用下的弹塑性位移特征 ,其稳定性优于水平力模式 ,便于确定结构层间位移和各构件的弹塑性变形 .
关键词 :静力弹塑性分析 ;等效单自由度 ;水平力模式 ;水平位移模式
中图分类号 :TU311.3 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2005)06-0688-04

1 问题的提出

静力弹塑性分析方法是确定结构在地震作用下弹塑性性能的一种实用方法^① .目前 ,经常采用的静力弹塑性分析方法是按水平力模式逐级加载的^[1~3] .水平力模式存在的主要问题是 ,在强地震作用下 ,随着结构构件逐渐进入弹塑性 ,各楼层的地震惯性力随之变化 ,使得基于水平力模式的静力弹塑性分析方法的前提条件不能成立 .为此 ,有人提出根据结构进入弹塑性后刚度和周期变化 ,修正水平力模式 ,以考虑在不同地震作用下水平力模式的变化^[4 5] ,但这极大地增加了计算难度 .
本文以钢筋混凝土框架结构为对象 ,研究在不同强度地震作用下的水平力模式和水平位移模式 ,指出采用基于水平位移模式的分析方法 ,克服基于水平力模式分析方法存在的理论不足 ,反映结构在地震作用下的弹塑性位移特征 ,其稳定性好于水平力模式 ,也便于确定结构层间位移和各构件的弹塑性变形 .

2 基于水平位移模式推覆分析

在基于位移抗震设计方法中 ,静力弹塑性分析结果的一个重要应用是将实际结构的多自由度体系等效为单自由度体系 .这一等效过程是基于位移模式进行的 .
多自由度体系在地震作用下的动力方程为

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + F(y) = - M\{ 1 \} \ddot{y}_0$$
 (1)

式中 : M , C ——结构质量和阻尼矩阵 ; $F(y)$ ——名义上的结构弹塑性恢复力 ; y ——位移向量 ,即为楼层侧移 .
设 y 由结构顶点位移 y_t 和位移形状向量 u 表示 , $y = u y_t$,其中 u 即本文所研究的位移模式(相对位移) ,于是式(1)可写成

$$Mu\ddot{y}_t + Cu\dot{y}_t + F(y) = - M\{ 1 \} \ddot{y}_0$$
 (2)

式(2)两边乘以 u^T ,得

$$u^T Mu\ddot{y}_t + u^T Cu\dot{y}_t + u^T F(y) = - u^T M\{ 1 \} \ddot{y}_0$$
 (3)

令
$$y_t = \frac{u^T M\{ 1 \}}{u^T Mu} \ddot{y}_0$$
 (4)

即等效位移为
$$y_e = \frac{u^T Mu}{u^T M\{ 1 \}} y_t$$
 (5)

收稿日期 :2005-03-30
基金项目 :江苏省建设厅指导性资助项目(JS2003ZD07) 扬州大学基金资助项目(LK0310071)
作者简介 :李琪(1956—) ,男 ,湖南宁远人 ,副教授 ,学士 ,主要从事结构抗震研究 .
① SEAOC Vision 2000 Committee. Performance-based Seismic Engineering. Sacramento ,USA : Report Prepared by Structural Engineering Association of California ,1995 .

设等效质量

$$M_e = u^T M \{1\}$$

等效阻尼

$$C_e = u^T C u \frac{u^T M \{1\}}{u^T M u}$$

等效恢复力

$$F_e = u^T F(y)$$

于是式 (3) 写为

$$u^T M \{1\} \ddot{y}_e + u^T C u \frac{u^T M \{1\}}{u^T M u} \dot{y}_e + u^T F(y) = - u^T M \{1\} \ddot{y}_0 \tag{6}$$

即得等效单自由度体系的动力方程 $M_e \ddot{y}_e + C_e \dot{y}_e + F_e = - M_e \ddot{y}_0$ (7)

以上等效单自由度的推导过程是基于位移模式(即位移形状向量 u)进行的,而基于水平力模式(即公式中的 $F(y)$)无法进行等效,因此将基于水平力模式的静力弹塑性分析结果用于等效单自由度,进而用于基于位移抗震设计中,这在理论上存在不足。

3 基于水平位移模式的弹塑性分析方法

水平位移模式是指以顶层水平侧移为基准得到的楼层水平位移分布形状。其弹塑性分析方法是 (a) 将各楼层加上水平位移约束 (b) 以顶点位移为控制位移, 将各楼层的水平位移约束按设定的位移模式逐级施加位移增量 (c) 在各级位移增量下, 进行结构的弹塑性分析, 得到各楼层位移约束处的约束力, 该约束力即为相应的楼层地震力, 而首层的层剪力即为基底剪力。

基于以上方法, 可以得到结构基底剪力-顶点位移关系、楼层剪力-层间位移关系以及各结构构件随顶点位移增加产生的弹塑性内力和变形, 由此确定结构抗震性能。

4 水平力与水平位移模式分析

以一栋 8 层钢筋混凝土框架结构为例, 分别采用两种模式进行计算。结构计算简图见图 1。1~4 层梁、柱截面尺寸: C1~C3 为 500 mm×500 mm, C4 为 550 mm×550 mm, B1, B3 为 250 mm×500 mm, B2, B4 为 250 mm×300 mm, B5, B6 为 250 mm×400 mm; 5~8 层梁、柱截面尺寸: C1~C3 为 450 mm×450 mm, C4 为 500 mm×500 mm, B1~B6 同 1~4 层。除底层层高为 4.5 m 外, 其余层高均为 3.6 m。混凝土强度等级为 C25, 纵筋强度等级为 HRB335, 箍筋为 HPB235。结构分析采用 CANNY^[6,7] 的杆系模型, 并引用多种恢复力模型, 以模拟材料和构件的非线性和弹塑性特性。地震输入为 El Centra(NS), 分别在小震、中震、大震和罕遇地震(设防烈度 7 度, 对应的地面峰值加速度分别为 0.055 m/s², 0.150 m/s², 0.310 m/s², 0.310 m/s²) 作用下进行弹塑性动力时程分析。

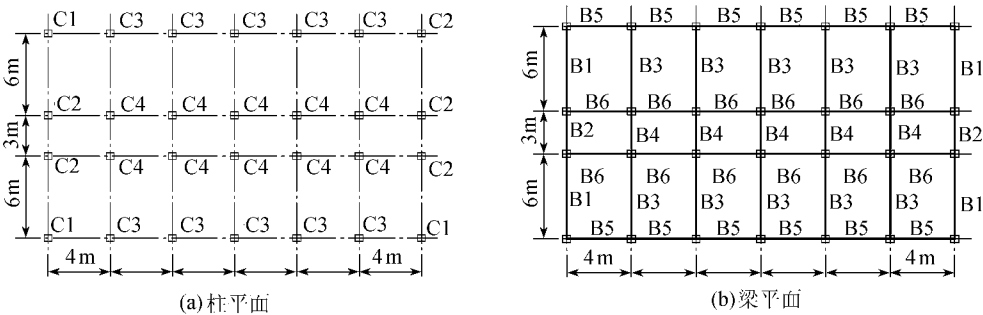


图 1 结构平面图

Fig.1 Structural planes

图 2 和图 3 给出了不同地震强度下结构的位移模式和水平力模式的对比情况, 可见, 在不同强度地震作用下, 位移模式具有较好的一致性, 而水平力模式则相差很大。这是因为在地震作用下, 结构按位移模式作往复振动, 而楼层地震水平力则随着结构进入弹塑性程度的不同而不断发生变化。采用水平力模式进行推覆分析时, 却未考虑这种结构受力特征。

图 4~6 分别为按基于水平位移模式和水平力模式进行静力弹塑性分析, 得到的不同强度地震作用下楼层水平力、楼层水平位移和层间位移与时程分析的对比结果。水平位移模式取大震时的位移模式, 水平力模式取倒三角水平力分布。由图 4~6 可见, 地震震级愈高时, 基于位移模式分析结果比基于水平力分析结果与时程分

析结果愈接近,计算结果愈相吻合(图 5 显示位移模式与时程分析的层间位移分布曲线重叠在一起)。

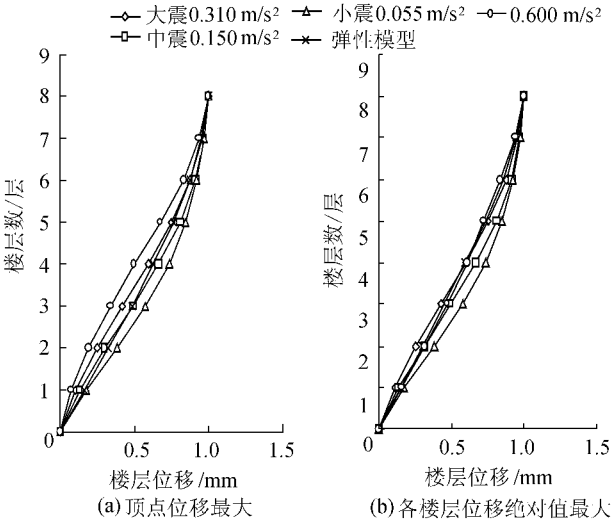


图 2 楼层的位移模式

Fig.2 Floor displacement-pattern

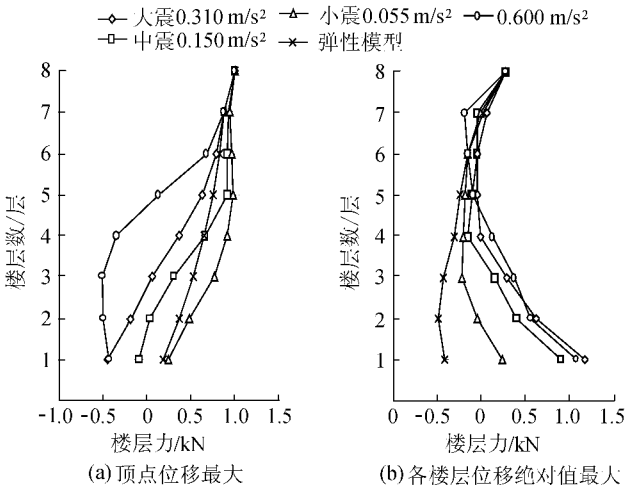


图 3 楼层的水平力模式

Fig.3 Floor load-pattern

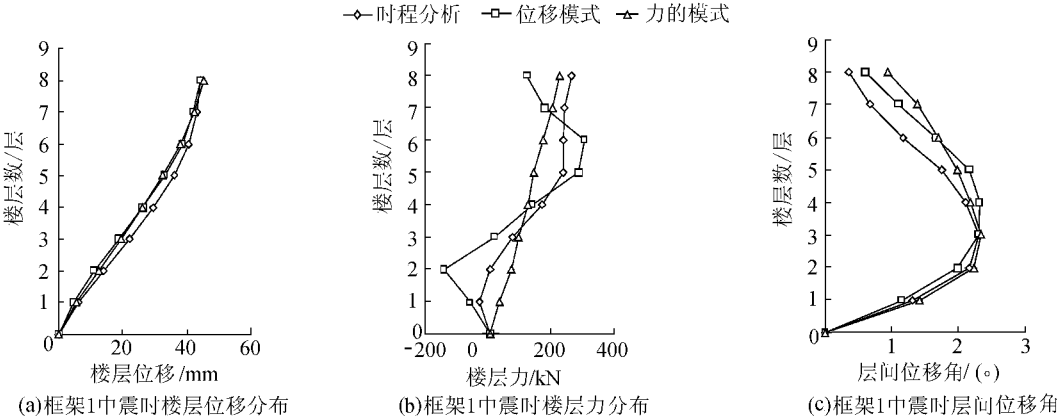


图 4 中震时 3 种分析方法结果比较

Fig.4 Comparison of results of three analysis methods in middle earthquake

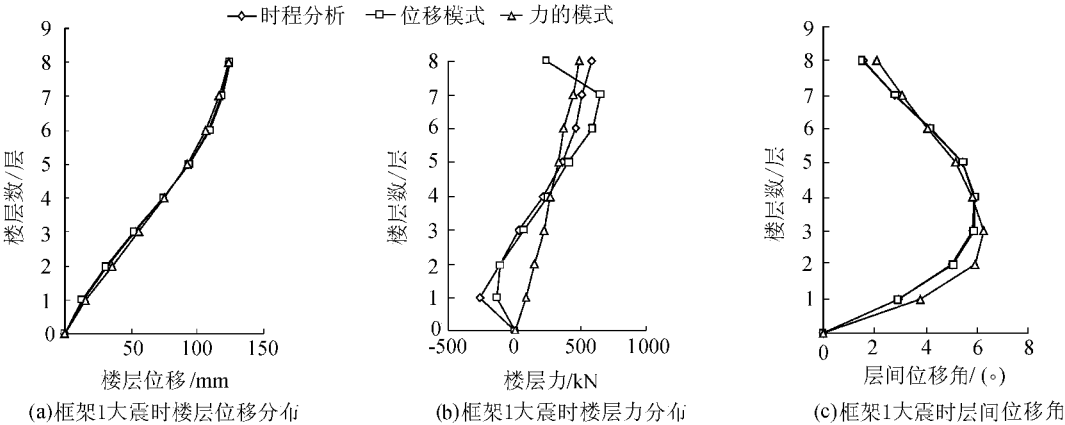


图 5 大震时 3 种分析方法结果比较

Fig.5 Comparison of results of three analysis methods in heavy earthquake

5 结 语

a. 基于位移模式进行的结构多自由度体系等效为单自由度体系,理论可靠,克服了目前基于水平力模

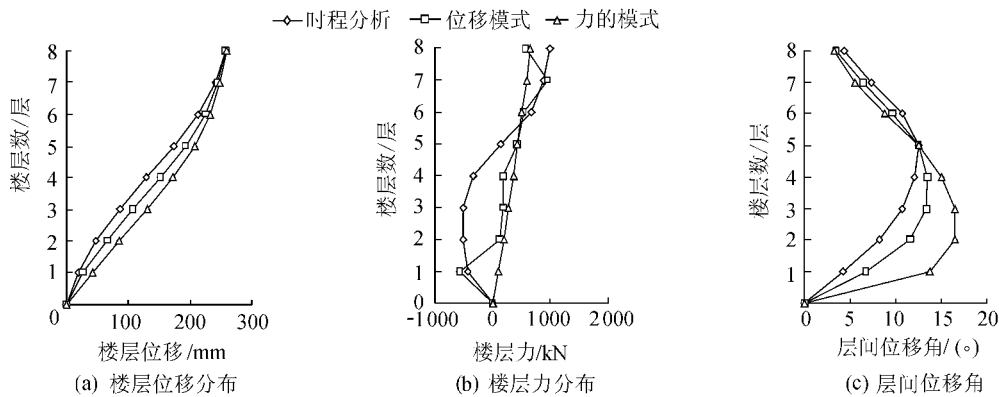


图 6 罕遇地震时(0.600 m/s²)3种分析方法结果比较

Fig.6 Comparison of results of three analysis methods in rare earthquake(0.600 m/s²)

式分析方法理论中存在的不足。

b. 在不同强度地震作用下,位移模式具有较好的一致性,而水平力模式则相差较大.因此,采用水平位移模式比水平力模式更能全面地反映在不同地震强度作用下的结构受力特征.

c. 地震震级愈高时,与时程分析结果对比,基于位移模式分析结果较基于水平力分析结果更相近,计算结果愈相吻合.

参考文献：

[1] 杨溥,李英民,王亚勇,等. 结构静力弹塑性分析(Push-over)方法的改进[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1):44—51.
[2] 尹华伟,汪梦甫,周锡元. 结构静力弹塑性分析方法的研究和改进[J]. 工程力学, 2003, 20(4):45—49.
[3] 叶献国,周锡元. 建筑结构地震反应简化分析方法的进一步改进[J]. 合肥工业大学学报, 2000, 23(2):149—153.
[4] 汪梦甫,周锡元. 关于结构静力弹塑性分析(Push-over)方法中的几个问题[J]. 结构工程师, 2002(4):17—22.
[5] 钱稼茹,罗文斌. 静力弹塑性分析——基于性能/位移的抗震设计分析工具[J]. 建筑结构, 2000, 30(6):23—26.
[6] 李康宁, TETSUO K. 建筑物三维分析模型及其结构地震反应分析的可靠性[J]. 建筑结构, 2000, 30(6):14—18.
[7] 李康宁,洪亮. 结构三维弹塑性分析方法及计算机程序 CANNY[J]. 四川建筑科学研究, 2001, 27(4):1—6.

Displacement-pattern-based static elasto-plastic analysis method

LI Qi¹, GU Rong-rong², MIAO Zhi-wei³, WANG De-xin¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Civil Science & Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225092, China;
3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract :In displacement-pattern-based aseismic design, the static elasto-plastic analysis method was used to analyze the elasto-plastic performance of structures in earthquakes. The horizontal displacement-pattern-based analysis method overcomes the disadvantage of the horizontal load-pattern-based analysis method in theory, and can reflect the elasto-plastic displacement of structures in earthquakes. With high stability, the displacement-based analysis method is superior to the load-pattern-based method, and is easy to determine the interlayer displacement of structures and the elasto-plastic displacement of each component.

Key words :static elasto-plastic analysis; equivalent single degree of freedom; horizontal load-pattern; horizontal displacement-pattern