

[文章编号] 1002-8412(2008)01-0055-05

# Pushover 方法的准确性和适用性研究

缪志伟,马千里,叶列平,陆新征 (教育部工程结构与振动重点实验室,清华大学土木工程系,北京 100084)

[摘要] Pushover 方法作为一种建筑结构弹塑性地震响应的简化近似计算方法和抗震性能评价方法已得到广泛应用。但由于其理论基础不严密,其准确性需要给予必要确认,同时其适用性也应受到一定的限制。本文以逐步增量弹塑性时程方法的结果为基准,分别以一个普通 6 层 RC 框架结构和一个 18 层 RC 框架-剪力墙结构为例,对 Pushover 方法的准确性和适用性进行了分析研究。结果表明,Pushover 方法仅适用于以第一振型为主的高度不大的结构,且应采用两种以上的侧力模式;对于高阶振型影响较大的结构,该方法的准确性较差,承载力预测显著偏低。

[关键词] Pushover 分析;框架结构;框架-剪力墙结构;逐步增量弹塑性时程分析

[中图分类号] TU311.4 [文献标识码] A

## Study on the Accuracy and Applicability of the Pushover Analysis

Miao Zhi-wei, Ma Qian-li, Ye Lie-ping, Lu Xin-zheng (MOE Key Lab of Structural Engineering and Vibration, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The nonlinear static pushover analysis procedure is now widely used as a simple method to estimate the inelastic seismic response for building structures. However, the accuracy of the method still needs to be validated because of the inherent limitations in its theory. Besides, there are some limitations on the application of this method. In this paper, the accuracy and the applicability of the pushover analysis procedure are verified based on the incremental dynamical analysis method with a 6-storey RC frame and an 18-storey RC frame-wall structure. The comparison between the results of the two methods shows that the pushover method can be used only for lowrise building structures that their responses are controlled by the first modal. It is also shown that for the highrise building structures which are much influenced by the higher modal, pushover analysis always gives the much lower capacity results.

**Key words:** pushover analysis; RC frame; frame-wall structure; incremental dynamical analysis

### 1 前言

除需确定结构的抗震承载力需求外,基于性能/位移抗震设计方法的一个重要工作,是确定强震作用下结构及其构件的弹塑性变形需求。弹塑性时程分析虽然可以准确预测结构在强震作用下的受力和变形性能,但却受到地震波输入的不确定性和计算代价偏高的制约。在这种情况下,一种简化近似的结构弹塑性地震响应计算方法——Pushover 方法被提了出来。该方法已被美国的 ATC-40, FEMA273、274、356 正式采用<sup>[1,2]</sup>,并给出了具体规定。我国的《建筑抗震设计规范》GB50011-2001<sup>[3]</sup>也将该方法作

为验算结构在罕遇地震下弹塑性变形的的方法之一,但未给出具体规定。然而,由于 Pushover 方法是一种以静力分析代替动力时程分析的方法,其理论基础不严密,预测结果与结构实际弹塑性动力响应势必存在一定差异。本文以逐步增量弹塑性时程方法为基准,分别对一个普通 6 层 RC 框架结构和一个 18 层 RC 框架-剪力墙结构,采用不同侧力分布模式进行 Pushover 分析,通过与逐步增量弹塑性时程方法的分析结果对比,讨论了 Pushover 方法的准确性和适用性。

### 2 Pushover 方法简介

Pushover 方法是依据符合水平地震力分布规律的侧力模式,采用逐步增加水平侧力的静力弹塑性分析,得到结构的弹塑性承载力-位移关系全过程,并由等效单自由度体系(如能力谱方法)确定强震下

[收稿日期] 2007-08-23

[基金项目] 国家十一五科技支撑计划(2006BAK01A02-09)  
清华大学基础研究基金资助(JC2007003)

的目标位移,进而获得强震作用下的结构弹塑性地震响应。

Pushover方法中,不同侧力模式对分析结果有直接的影响,已有很多学者对此进行过深入研究<sup>[4,5]</sup>。FEMA356<sup>[2]</sup>建议至少从以下两组侧力模式中分别选取一种侧力模式:第一组是振型相关的侧力模式,包括:考虑楼层高度影响的侧力分布(结构高度较低时,即为倒三角分布),按第一振型比例型侧力分布和振型组合侧力分布(简称“SRSS侧力模式”);第二组侧力模式包括质量比例型侧力模式(若结构各层质量相等,即为均匀分布模式)和自适应侧力模式。除FEMA356中所建议的几种侧力模式外,按我国抗震规范<sup>[3]</sup>规定的底部剪力法,水平地震作用可采用倒三角分布加顶部附加水平地震作用,这也是一种侧力模式,以下简称“规范侧力模式”。

此外,为考虑高阶振型的影响,Chopra提出了MPA方法<sup>[6]</sup>。该方法需要根据结构的振型情况对结构进行多次Pushover分析,步骤较多,本文主要研究采用单一固定侧力模式的Pushover方法,不包括MPA方法。

### 3 逐步增量弹塑性时程分析方法简介

对于一条特定的地震动输入,通过设定一系列单调递增的地震强度指标,并对每个地震强度指标进行结构弹塑性时程分析,可得到结构在不同地震强度作用下的一系列弹塑性地震响应,称为逐步增量弹塑性时程分析方法(Incremental Dynamic Analysis,简称“IDA方法”<sup>[7]</sup>)。该方法能够反映结构在同一地震的不同强度作用下的抗震性能,可对结构的抗震能力作出较为全面的评价。因此,本文以IDA方法的分析结果为基准,来讨论Pushover方法的准确性和适用性。

### 4 结构分析模型和分析软件

根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2001,分别设计了一个6层RC框架结构和一个18层RC框架-剪力墙结构。两个结构的平面尺寸见图1和图2,底层层高4.2m,其它层均为3.6m,设计地震烈度为8度,地震分组为第一组,二类场地。6层框架结构顶层恒荷载8.5kN/m<sup>2</sup>,活荷载2.0kN/m<sup>2</sup>,其余层恒荷载8.0kN/m<sup>2</sup>,活荷载2.0kN/m<sup>2</sup>,前三阶周期分别为1.05s、0.34s和0.19s,一阶振型参与质量占总质量的83%,前三阶占97%。18层框架-剪力墙结构顶层恒荷载9.0kN/m<sup>2</sup>,活荷载0.5kN/m<sup>2</sup>,其余层

恒荷载8.0kN/m<sup>2</sup>,活荷载2.0kN/m<sup>2</sup>,前三阶周期分别为1.98s、0.49s和0.21s,一阶振型参与质量占总质量的69%,前三阶占91%。

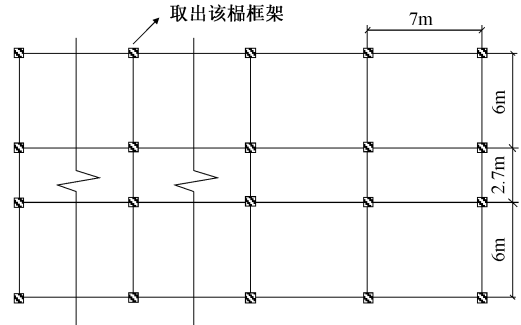


图1 框架结构平面示意图

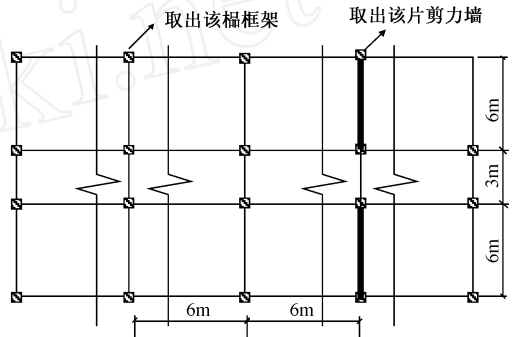


图2 框架-剪力墙结构平面示意图

Pushover分析和IDA分析均采用基于通用有限元计算软件MSC.MARC开发的适用于RC杆系结构纤维模型和适用于剪力墙的分层壳模型<sup>[8]</sup>,分析中均考虑了P-效应。弹塑性动力时程分析时,采用经典Rayleigh阻尼,阻尼比取5%。

### 5 IDA分析的地震动输入

按照美国地质勘测中心(United States Geological Survey,USGS)对场地土的划分,将地震记录分为四组,记为S1、S2、S3、S4,场地土剪切波速分别为大于750m/s、360~750m/s、180~360m/s以及小于180m/s。本文分析的结构所在的类场地土特性与S2场地相似,故从S2场地选取了10条峰值加速度在0.1~2g之间的强震记录作为弹塑性时程分析用地震动输入,选择时尽量避开同次地震得到的记录。IDA分析主要通过变化10条地震波的峰值加速度(PGA)逐步进行,为此PGA分别取0.7m/s<sup>2</sup>、1m/s<sup>2</sup>、1.5m/s<sup>2</sup>、2m/s<sup>2</sup>、2.5m/s<sup>2</sup>、3m/s<sup>2</sup>、3.5m/s<sup>2</sup>、4m/s<sup>2</sup>、5m/s<sup>2</sup>、6m/s<sup>2</sup>、7m/s<sup>2</sup>、8m/s<sup>2</sup>、9m/s<sup>2</sup>及10m/s<sup>2</sup>。

### 6 结果分析

由于 Pushover 分析是静力分析,所得到的结构基底剪力和顶点位移是同时达到最大值,而弹塑性动力时程分析所得到的最大基底剪力和最大顶点位移通常不是发生在同一时刻,因此若将 IDA 曲线以基底剪力 - 顶点位移的形式表达,则与 Pushover 分析结果无可比性。而对结构某局部部位而言,结构弹塑性动力分析得到恢复力和变形基本在同一时刻达到最大值,而且基于位移设计的最终目标就是要确定结构各部位的弹塑性变形,因此针对结构各部位恢复力 - 变形关系的 IDA 曲线与 Pushover 曲线的

对比分析更具有实际意义。由于对结构所有部位的全面对比数据量太大,本文主要以层间剪力 - 层间位移关系的“层间 IDA 曲线”与“层间 Pushover 曲线”进行对比,研究 Pushover 分析结果的准确性和适用性。计算所得到的两个结构的“层间 IDA 曲线”与“层间 Pushover 曲线”的比较分别见图 3 和图 4(限于篇幅,18 层框 - 剪结构只给出了部分楼层的结果),图中还标示了 PGA 为 400gal 的强震作用下由弹塑性时程分析得到的两个结构各层平均最大层间位移  $d_{400gal}$  和加 1 倍均方差  $+σd_{400gal}$  的结果。

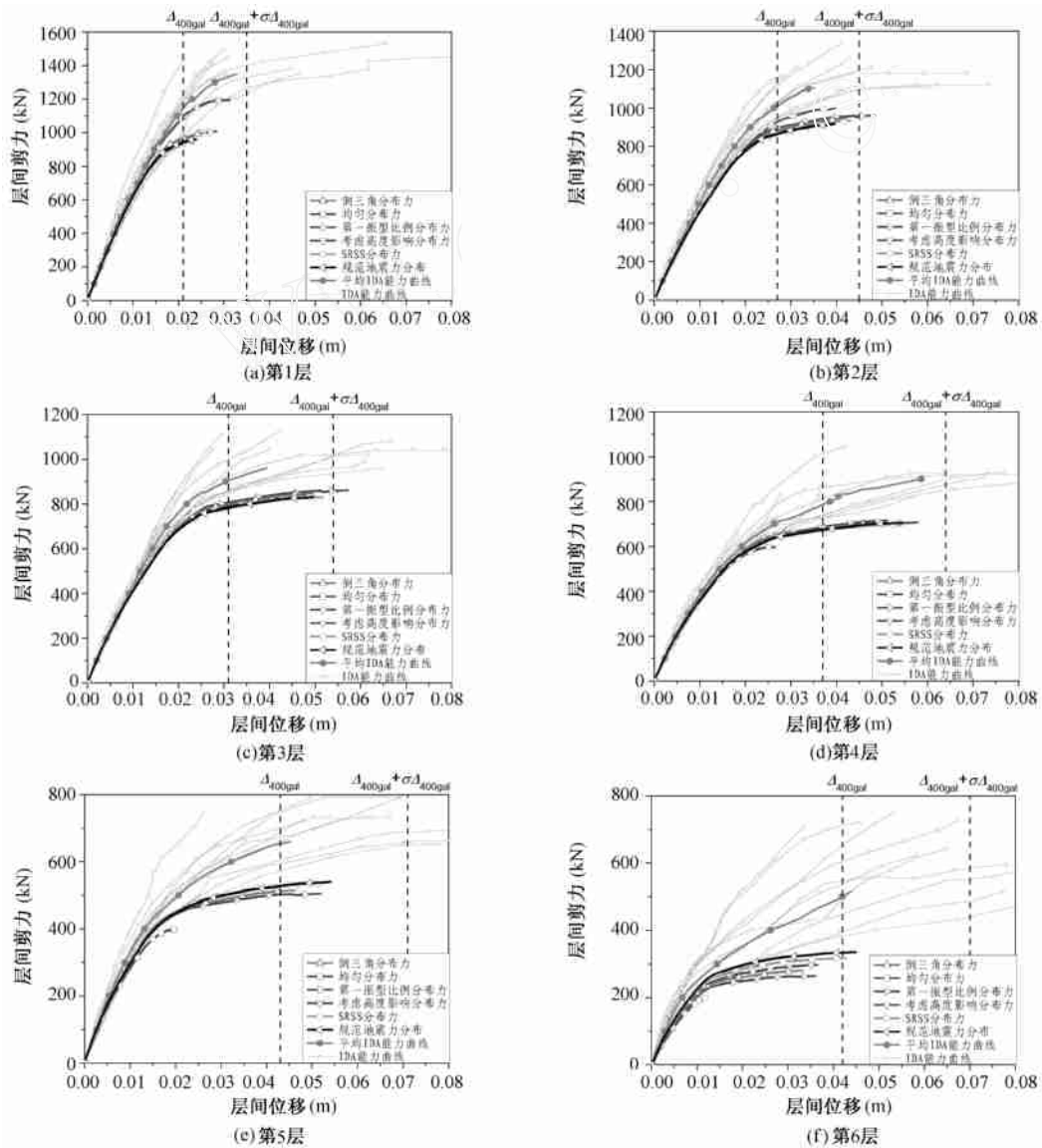


图 3 6 层框架结构 Pushover 分析与 IDA 分析的层间剪力 - 位移曲线比较

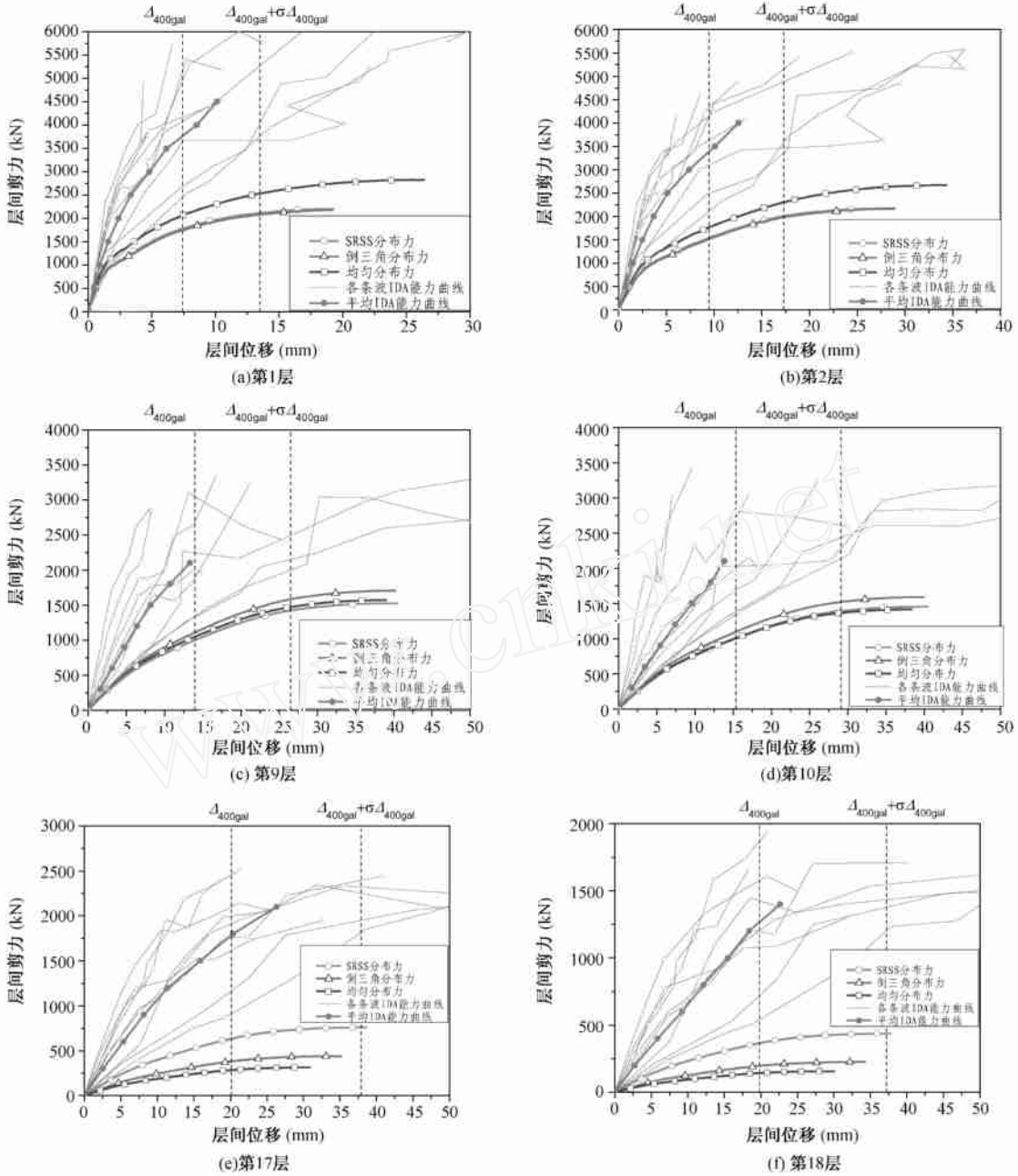


图4 18层框剪结构 Pushover 分析与 IDA 分析的层间剪力 - 位移曲线比较

(1) 6层 RC 框架结构

对于第一、二层,不同侧力模式的层间 Pushover 曲线的初始刚度相差很小,与平均层间 IDA 曲线的初始刚度都比较接近。但随着层间变形的增大,只有均布侧力模式的层间 Pushover 曲线与平均层间 IDA 曲线较为接近,而其它几种侧力模式的层间 Pushover 曲线基本为层间 IDA 曲线的偏下限。

对于第三、四层,各侧力模式的层间 Pushover 曲线结果基本相同,且为层间 IDA 曲线的偏下限。

对于第五、六层,均布侧力模式的层间 Pushover 曲线明显小于其它侧力模式的结果,而其它几种侧力模式的层间 Pushover 曲线比较相近,但也为层间 IDA 曲线的偏下限。相比而言,SRSS、考虑高度影响和规范三种侧力模式的层间 Pushover 曲线更接近层间 IDA 曲线。

综合以上结果,对于以第一振型为主的中低层结构,宜采用多种侧力分布模式相结合的 Pushover 分析,以获得对结构抗震性能作较为全面的评价。

对于结构底部楼层,宜采用均布侧力模式分析结果,而对于其它楼层,应采用近似考虑高阶振型影响侧力分布模式(如 SRSS 侧力模式、考虑高度影响的侧力模式等)的 Pushover 分析结果。

## (2) 18 层 RC 框架 - 剪力墙结构

图 4 结果表明,对于底部楼层(1、2 层),采用均布侧力模式的层间 Pushover 曲线高于其它侧力模式结果;对于中部楼层(9、10 层),几种侧力模式的层间 Pushover 曲线相差很小;对于顶部楼层(17、18 层),SRSS 侧力模式的层间 Pushover 曲线高于其它侧力模式,而均布侧力模式的层间 Pushover 曲线则最低。这种不同侧力模式层间 Pushover 曲线随楼层位置的变化趋势与前述 6 层 RC 框架的结论基本相同。但是,对于 18 层的框架 - 剪力墙结构,所有侧力模式的 Pushover 曲线均显著低于 IDA 曲线,这表明对于高度较高、且受高阶振型影响较大的高层结构,Pushover 方法均不能给出准确的结果。造成这种问题的原因是由于 Pushover 方法本身是一种以静力分析来代替动力时程分析的简化近似方法,因此必然会忽略结构的某些动力响应特性。本文所研究的 18 层 RC 框 - 剪结构,其地震响应并不完全受控于第一振型,而是受高阶振型影响较大,并且由于不同地震波的频谱组成有较大差别,高阶振型对不同地震波的地震响应影响也不相同,因此由 IDA 曲线可见其地震响应的离散性也很大。因此,采用任何一种单一侧力模式(包括近似考虑了高阶振型影响的 SRSS 侧力模式)的 Pushover 分析,都无法完全体现高阶振型的影响,造成 Pushover 分析结果与结构实际弹塑性地震响应的较大差异。

## 7 结语

本文通过对一个 6 层 RC 框架结构和一个 18 层 RC 框架 - 剪力墙结构的 IDA 分析结果与 Pushover 分析结果的对比,得到以下结论:

(1) IDA 曲线来自于结构的弹塑性时程分析结果,最接近结构的实际抗震性能,也是目前作为评价 Pushover 分析结果准确性的最好依据。采用多条地震记录的 IDA 曲线与 Pushover 曲线进行对比,可以在统计意义上评价 Pushover 分析结果的准确性。

(2) 对于总高度较低、且弹塑性地震响应主要取决于第一振型的结构,可以采用 Pushover 方法,但

需采用两种不同形式侧力模式。根据本文分析研究,对于结构底部楼层,宜采用均布侧力模式的 Pushover 分析结果,而对于其它楼层,可以采用近似考虑高阶振型影响的侧力分布模式(如 SRSS 分布模式,考虑高度影响的侧力分布模式等)的 Pushover 分析结果。

(3) 对于总高度较高、且受高阶振型影响较大的结构,无论采用何种固定侧力模式,均与弹塑性时程分析结果有较大的差距,不能准确反映结构的抗震性能。因此,对于这种类型的结构,采用单一固定侧力分布模式进行 Pushover 方法来确定其弹塑性地震响应是不合适的。

尽管如此,采用 Pushover 方法来确定结构的薄弱部位仍具有一定的参考价值。此外,Pushover 分析结果一般来说是偏于保守的,但对受高阶振型影响较大的结构则过于保守。因此,正确认识 Pushover 方法的准确性和适用性,有助于在实际工程中更合理的采用这种简化近似方法。

## 参考文献:

- [ 1 ] Applied Technology Council, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings[S]. ATC-40, 1996
- [ 2 ] FEMA273, FEMA274, FEMA356. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings[S]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 1996
- [ 3 ] GB50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001
- [ 4 ] 熊向阳,戚震华. 侧向荷载分布方式对静力弹塑性分析结果的影响[J]. 建筑科学,2001,17(5):8~13
- [ 5 ] 侯爽,欧进萍. 结构 Pushover 分析的侧向力分布及高阶振型影响[J]. 地震工程与工程振动,2004,24(3):89~97
- [ 6 ] Anil K Chopra and Rakesh K Goel. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings[J]. 2002, 31:561~582
- [ 7 ] Dimitrios Vamvatsikos and C Allin Cornell. Incremental dynamic analysis[J]. Earthquake Engng Struct Dyn, 2002, 31: 491~514
- [ 8 ] 叶列平,陆新征,等. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[J]. 工程力学,2006,23(z2):131~140