

建筑结构抗震研究若干基本问题概述及讨论

孙景江

(中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080)

摘要 本文介绍和讨论了结构抗震研究中的一些基本问题, 包括地震反应分析选择地面运动输入应注意的问题, 高层结构地震模拟试验问题和结构地震反应分析中的主要分析方法和存在的问题, 最后简要介绍了目前常用结构反应分析程序。

关键词: 建筑结构 地震反应 分析模拟 分析程序

前言

研究结构抗震性能有3种基本途径, 即震害经验总结、地震模拟试验和计算机模拟分析。通过大量震害经验总结, 人们对一般建筑结构的抗震性能已有了较明确的认识, 在此基础上, 研究并形成了较可靠的抗震设计要求和设计方法。但对于一些新型结构, 诸如高层、大跨等结构, 震害经验极少, 不足以总结归纳出成熟的经验。地震模拟试验是研究结构抗震性能的重要手段, 通过试验, 已成功地解决了许多抗震问题。但应注意, 在进行高、大复杂结构试验时, 除了成本昂贵外, 最关键的问题是当这些结构模型比例尺较小时, 试验结果的可靠程度就较差, 只能用来定性地估计其抗震性能, 进行定量研究的价值有限。目前抗震研究广泛应用的方法还是计算机模拟分析方法。关于结构弹性反应分析方法, 至今已经发展的较为成熟, 只要结构模型简化的合理, 均可给出相当可靠的分析结果。结构弹塑性地震反应性态极其复杂, 尽管经科研人员数十年的努力, 发展了一些分析方法, 但仅较规则的结构二维弹塑性分析可以取得基本令人满意的结果, 而量大面广的复杂结构的分析方法至今未能很好解决。

弹塑性地震反应可以分为静力弹塑性反应分析和动力时程反应分析。静力弹塑性地震反应分析一般指近年为满足性态抗震设计而发展的 pushover 分析方法, 该方法的主要步骤是首先将地震荷载等效成某种分布形式的静力荷载, 用静力弹塑性分析方法求得结构的基底剪力与位移关系曲线, 即结构能力曲线, 然后将结构等效成单自由度体系并将结构的能力曲线和地震输入谱曲线转换成相同坐标格式, 根据两曲线的交点确定结构位移反应。研究表明这一分析方法在分析中低层剪切型结构时, 可以提供较满意的弹塑性位移反应估计结果, 而分析

【收稿日期】 2006-01-20

【作者简介】 孙景江, 男, 生于1953年。研究员, 博士生导师。主要研究领域: 地震工程。

E-mail: jingjiangsun@sina.com

高层结构时,则误差较大,所产生的原因,目前基本上归咎于未能考虑高阶振型影响。因此,Chintanapakdee 和 Chopra (2003) 提出了一种考虑多振型的 pushover 分析方法试图解决这一问题。笔者对此有两点不同意见:首先在笔者(2003)的文章中已指出,其原因并不仅仅是未能考虑高阶振型影响,而更主要的是来自侧向分布荷载作用下,所求出的高层结构的能力曲线与结构在实际地震动作用下的能力曲线有较大差别造成的,其次, pushover 分析方法的研究发展本身是为工程提供一种简便的弹塑性地震反应估计方法,它直观、简便,特别是可以利用反应谱,意图使工程师接受,走向实际应用。但多振型 pushover 分析方法已完全丧失了其简便、直观的特点,十分复杂,最终还是一种近似方法,与其这样,莫不如直接采用较精确的弹塑性时程反应分析方法。在此,笔者再次提出,在上述问题未能很好解决之前,不能采用 pushover 分析方法进行高层结构弹塑性地震反应分析。

估计结构的弹塑性地震反应行为,较准确、可靠的方法无疑是弹塑性时程反应分析方法。但目前仅二维分析方法发展的较为成熟,并在研究中得到广泛应用,问题是大部分实际需要进行弹塑性分析的结构形式均较为复杂,难以简化成合理的二维分析模型,如果勉强进行二维分析模型简化,必将导致分析结果的较大误差。

三维结构弹塑性地震反应分析一直是结构抗震分析中有待解决的难题。主要困难是如果以构件作为单元,则构件三维受力状态下的恢复力模型难以确定;如果采用较精细的非线性有限元模型,则依然存在构件三维受力状态下的本构关系难以确定问题,且计算量也难以接受。为此,这方面的研究进展受到极大阻碍。虽说 SAP2000、ETABS 和 PKPM 等程序具有三维弹塑性地震反应分析功能,但由于上述原因在实际复杂结构弹塑性地震反应分析中应用很少。

总之,目前建筑结构弹塑性地震反应分析方法虽已提出不少,但都存在这样或那样的问题,难以广泛接受。

Newmark 和 Hall (1969) 提出:在地震动作用下,对于高频体系,最大加速度反应近似于常数,对于频率特别高的体系来说,最大加速度反应与地面最大加速度相等;相对来说,对于低频结构,最大位移反应也近似于常数,轻微地放大了地震动的位移,而对于频率特别低的结构体系来说,最大位移反应与地震动的位移相等,也就是说,无论结构处于弹性或弹塑性状态,其顶点位移与地面运动位移相等,即等位移原则。

很多研究者提出对诸如高层等长周期结构,可以应用上述原则,根据弹性地震位移反应分析结果估计结构的弹塑性地震位移反应。这是一个较好地解决高层结构三维弹塑性地震反应估计的途径,并且较易实现。问题是这一方法文献中提及较多,而系统研究并不多见。

笔者对利用等位移原则估计高层结构弹塑性地震位移反应问题进行了探讨,认为作为一种近似方法,可以采用其进行高层结构的大震位移反应估计。

另外,在进行结构地震反应分析时,地面运动输入也是一个需要非常重视的问题。结构工程师应当了解有关地震的基本知识,反应谱、实际地震波和模拟地震波的由来和特性,以及为什么重要结构要采用地震安全性评价结果作为地震输入等,只有这样才能真正做好结构抗震设计。

以上对建筑结构的抗震性能研究的几个基本问题进行了概要讨论,下面将就这些问题展开进一步介绍与讨论。

1 结构抗震性能研究中地震输入、计算模拟和常用程序等的介绍及讨论

1.1 地面运动输入

结构地震反应分析中首先要考虑合理的地震输入。地震输入有两种形式: 地震反应谱和地面运动时程。

1.1.1 反应谱输入

反应谱输入一般采用抗震规范提供的标准反应谱, 比如我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)(中华人民共和国建设部, 2001)规定的地震反应谱。该反应谱平台值 α_{\max} 由地面运动加速度峰值乘以放大系数 2.25 再除以重力加速度 g 得到, 特征周期 T_g 随场地条件的不同而改变。该反应谱是由大量地震记录反应谱统计平均并作了适当调整给出。与国外抗震规范反应谱相比, 我国反应谱平台值取值略低(国外放大系数取值也不尽相同, 有的还随场地条件不同而改变, 但平均值一般在 2.5 左右), 曲线下降段差别不大, 考虑到长周期结构反应主要由位移控制, 因此反应谱长周期直线下降段与实际地震记录反应谱平均值相比作了较大提高调整。

对于重要结构还可输入地震安全性评价提供的反应谱进行地震反应分析。提供此类反应谱的专业人员要特别注意长周期谱值和平滑化问题。如前所述, 规范中的反应谱在长周期阶段作了较大人为提高调整, 原因是考虑到长周期结构反应主要由位移控制, 因此地震安全性评价提供的反应谱亦要考虑这一因素, 在长周期阶段不能简单提供几条安全性评价地震波的反应谱的平均值, 否则将不能保证结构抗震性能安全。另外一个问题就是要将安全性评价地震波的反应谱的平均值很好地平滑化。

1.1.2 地面运动时程输入

进行结构地震时程反应分析时, 输入的地面运动时程有几种形式: 实际地震地面运动记录; 拟合反应谱得出的人造地震动; 地震安全性评价提供的地面运动时程。在选择实际地震动时, 不能认为选择相同场地条件就可以了, 因有时即使相同场地条件下的地震波, 其频率成分差别相当大。建筑抗震设计规范提供了一种较好的选择方法, 即要求所选择的地震波的反应谱的平均值与振型分解反应谱法所采用的反应谱在统计意义上相等。笔者以往在选择地震波时, 亦首先将地震波的反应谱画出, 与规范反应谱比较, 选择能够代表典型场地卓越频率的波进行结构反应分析。

在选择拟合反应谱的人造地震波时, 除了检查该波的反应谱是否大体与目标谱相一致外, 还应检查该波的波形, 如果波形显示在绝大部分时间段均以较大峰值振动, 笔者认为这不是很好的人造波, 因与实际地震动特性相差太大, 将会对结构地震反应产生较大影响, 特别是在弹塑性地震反应分析时。

1.1.3 地震安全性评价结果应用

目前我国震区各大中城市广泛开展各种重要工程结构的地震安全性评价工作, 然而此项工作并未取得真正的意义, 主要有两条原因: 首先我国绝大部分建筑设计院使用中国建筑科学研究院编制的结构分析程序 PKPM, 该程序与国内外所有大型程序不同之处是不允许用户自定义输入地震荷载, 只能选择程序内部提供的地震荷载, 因此即使做了地震安全性评价, 结果也用不上; 其次, 地震安全性评价提供的结果绝大多数几乎与规范规定的设计地震动无

太大差别,即使在一些特殊情况下,比如覆盖土层特别厚或土层中间存在软弱夹层,做出的结果与规范规定差别较大,导致地震安全性评价人员在提供时往往存在较大顾虑,担心甲方不接受。众所周知,规范提供的地震作用是非常粗的各类场地统计平均结果,因此,对于重要结构要求进行地震安全性评价工作,以反映出建筑所在场地地震动的特殊性,既然做出这种特殊性,在仔细推敲、校核后,应当向甲方提供并予以解释。总之,对于非常重要的建筑结构,应当采用安全性评价地震动输入,既然花费大量人力、物力做了地震安全性评价,就理当应用其结果,否则就是极大浪费。解决这一问题的关键就是有关部门除了要求 PKPM 编制者允许用户自定义输入地震荷载外,还应出台相应的法律法规,界定应作地震安全性评价的结构范围,以及要求对这些结构必须按安全性评价结果进行抗震设计。

1.2 地震模拟试验

地震模拟试验是研究结构抗震性能的重要手段,通过试验,人们对许多工程结构的地震破坏机理有了较深刻的认识,并已成功地解决了许多结构的实际抗震问题。目前日本具有世界最大的振动台,台面尺寸是 $20\text{m}\times 15\text{m}$,我国和美国最大的振动台台面尺寸是 $6\text{m}\times 6\text{m}$,另外美国还具有多台联动地震模拟振动台,以便进行长大工程结构试验。地震模拟试验最重要的问题是试验模型与原型结构相似问题,可以说模型比例尺越大试验结果越好,因受制于振动台尺寸,很难保证大比例尺模型,但起码应保证大于 1:10,否则试验结果意义不大。像我国目前进行的大量小比例尺模型试验,就不具有什么意义。以钢筋混凝土高层结构为例,如果原型结构与模型比例尺为 1:30,结构 600mm 的柱子就变成了 20mm, $\phi 28$ 的钢筋就变成了 $\phi 1$,也就是说主筋直径 1mm,箍筋直径则更小,这种尺寸根本无法保证与原构件同样的施工过程、受力机制、刚度以及破坏模式。因此,虽然国外振动台比我国还大,但几乎未见进行过此类试验。我国大量进行该项试验,笔者认为大部分试验是浪费资金,建议有关专家应认真思考这一问题,对于超出规范限值的结构应当建议其作进一步更有意义的研究工作,而不是去作意义不大的小比例尺地震模拟试验。

1.3 结构地震反应分析

1.3.1 结构弹性地震反应分析

计算机科学的高速发展强有力地推动了结构分析学科的发展。以前大家熟悉的一些简化分析模型,如剪切模型,考虑梁变形作用的 D 值法以及框架剪力墙协同工作体系模型,在当前的研究与设计中已很少使用,取而代之的是三维空间有限元分析。就结构分析而言,有限元程序一般可分为通用有限元分析程序和结构专用分析程序。前者单元类型多、适应性强、功能强大,不足之处是不能像专用分析程序那样针对结构的特点加入一些特殊处理功能,如处理楼板平面内无限刚假定以及输出结构总体反应结果等(一般只能输出结点和单元反应结果)。如想实现上述要求,需特殊处理才能得以实现,从而增加了许多工作量。结构专用分析程序也是以有限元理论为基础,同时具备处理结构特殊假定与要求的各项功能,且前后处理针对结构特点编制,因而使用起来极其方便,缺点是不能像通用分析程序那样可以灵活地模拟各种复杂结构形式。

结构弹性反应分析理论研究工作已发展的较为完善。无论多么复杂的结构体系,只要计算模型简化的合理都能得到满足一定工程精度要求的结果。目前,这一领域的科研人员主要致力于增加程序的功能,减少分析前准备和分析后处理工作量,使分析程序更加智能化,提高研究和设计人员的工作效率。

1.3.2 结构弹塑性地震反应分析

结构弹塑性地震反应分析可以分为静力反应分析(一般指 Pushover 分析)和动力反应分析,其分析方法可概括地分为两大类:①非线性有限元方法,也可称之为微观方法(Micro Method);②工程非线性有限元方法,也可称之为宏观方法(Macro Method)。

钢筋混凝土微观有限元方法是将结构的每一构件均较细密离散,钢筋、混凝土分别采用不同的单元模拟,且遵循各自的本构关系。两者之间可以加入滑移单元,以描述其相互作用。这种分析方法随着计算机科学的发展,愈来愈显示出其强大的生命力。它已从分析结构构件、组件发展到分析简单结构甚至强震作用下复杂三维结构地震反应。虽然如此,但目前混凝土在复杂应力状态下的滞变性能以及与钢筋之间的相互作用关系等问题尚处研究阶段,加之分析复杂结构体系地震反应的数值工作量非常庞大,一般难以承受,因此该方法目前还仅限于研究应用。

宏观有限元方法一般是以一个构件作为一个单元,单元的本构关系通过试验或分析计算得到。某些情况下,构件本构关系描述较为准确,优于微观分析结果。有些则因构件形状、受力较为复杂,试验离散较大或与计算假定有一定距离等因素影响,使构件本构关系描述误差较大。

目前,采用宏观有限元方法的结构二维分析发展的较为成熟,并在研究中得到广泛应用,问题是大部分实际需要进行弹塑性分析的结构形式均较为复杂,难以简化成合理的二维分析模型,如勉强进行二维分析模型简化,必将导致分析结果的较大误差。

三维结构弹塑性地震反应分析虽说十分困难,但经广大研究人员的努力,还是取得一定进展。微观模型或微观和宏观相结合的分析模型越来越多地在大型分析程序中实现。相信随着研究的深入以及计算机速度和存储能力的发展,不久的将来结构弹塑性地震反应分析会像目前弹性地震反应分析那样可靠和广泛应用。

1.3.3 结构非线性 Pushover 分析

结构性能设计(Performance-based design)是美国科学家在美日近年遭受大地震侵害造成巨大经济损失后,经深刻反思、研究后提出的一种全新的结构抗震设计方法。性能设计的重要步骤之一是要求对结构在地震作用下的弹塑性性能有较为可靠的估计。以下两种分析方法可实现这一目标,一是结构弹塑性地震时程反应分析方法,另外则是简化静力弹塑性反应分析方法(即 pushover 方法)。

应当注意到 pushover 分析只是一种近似分析方法,因结构在强震作用下的动力反应性能十分复杂,不同的地震可能会使结构反应显著不同。想用静力弹塑性反应分析方法准确确定复杂动力系统反应的最大值和相应的破坏模式是不可能的。但问题是将来发生地震不可预测,因此用 pushover 分析方法来估计结构在将来可能发生的各种地震作用下的一种平均表现性能是可能的。按照所预测的结构在地震作用下平均表现性能和对结构的具体要求进行设计,无疑比现行的以承载力为基础的弹性设计方法要合理许多。

Pushover 分析方法的主要步骤是首先将地震荷载等效成某种分布形式的静力荷载,用静力弹塑性分析方法求得结构的基底剪力与位移关系曲线,即结构的能力曲线,然后将结构等效成单自由度体系并将结构的能力曲线和地震输入谱曲线转换成相同座标格式,根据两曲线的交点确定结构反应位移。

根据所使用输入谱形式的不同,所采用的求解方法也有所不同。在 ATC-40 中,所使用

的输入谱是弹性反应谱，反复迭代求解位移反应。其具体步骤如下：

- (1) 对结构进行弹塑性 pushover 分析，得到结构底部剪力与顶层位移的关系曲线；
- (2) 将 pushover 曲线转换成能力谱曲线；
- (3) 将 5% 阻尼弹性反应（或设计）谱从标准 A（伪加速度）- T（自振周期）格式转换成 A-D（位移）格式；
- (4) 进行位移反应迭代求解。首先假定初始位移为 5% 阻尼谱自振周期所对应的位移，即 $D_i = D(T_n, \zeta = 5\%)$ 。计算延性系数 $\mu = D_i / D_y$ ，由下式计算等效阻尼比 ζ_{eq} ：

$$\zeta_{eq} = \frac{2 \times (\mu - 1) \times (1 - \alpha)}{\pi \mu (1 + \alpha \mu - \alpha)}$$

等效线性系统总粘滞阻尼为

$$\zeta_{eqT} = \zeta + \kappa \zeta_{eq}$$

其中， ζ_{eq} 大于 0.45 时取为 0.45， κ 为阻尼修正系数；

- (5) 画出上一步计算出的 ζ_{eq} 所对应的弹性反应谱，从它与能力谱的交点读出位移 D 。若 $|(D_i - D_{i-1})| / D_i < \text{容许值}$ ，则位移反应为 $D = D_i$ 。否则，从计算延性系数开始下一步迭代；

- (6) 把最终得到的位移转换成顶层位移，即得到所需位移反应。

这种分析方法称为等效阻尼法，存在的问题是有时迭代不收敛。为了克服上述缺点，近年来的研究多集中在采用非弹性反应谱作为输入谱。

利用非弹性反应谱作为输入谱求结构位移反应步骤如下：

- (1) 对结构进行非线性 pushover 分析，得到结构底部剪力与顶端位移的关系曲线，并转换成能力谱曲线；

- (2) 把具有不同延性要求的非弹性设计谱或特定地面运动的非弹性谱转换成一定坐标格式的非弹性输入谱；

- (3) 求出能力谱曲线与非弹性输入谱的各个交点所对应的位移 D ，并计算 $\mu = D / D_y$ (D_y 为等效 SDOF 体系的屈服位移)。若计算的 μ 和某条谱曲线的延性要求 μ 相等，则能力谱曲线与这条谱曲线的交点所对应的位移就是所求的位移反应；

- (4) 把上一步得到的位移反应转换成顶层位移，即为所需位移反应。

以上简要地介绍了建筑结构 pushover 分析的基本方法，另外需要再次指出的是该方法目前用于中低层剪切型结构时结果较为理想，其它类型中低层结构结果次之，高层结构结果最差，不能应用。

为了能考虑高阶振型影响，以便进行高层结构 pushover 分析，Chintanapakdee 和 Chopra (2003) 提出了一种多振型的 pushover 分析方法，基本思路是选择结构前若干阶振型，分别按各振型变形模式加载，再用单自由度的 pushover 方法计算结构各振型反应，最后用平方和开平方方法求结构总位移反应。如前所述，笔者认为该方法丧失了 pushover 方法简便、直观的特点，尤其是过程特别复杂，结果还是近似方法，与其这样，莫不如直接采用时程分析方法。

1.3.4 利用等位移原则估计长周期结构弹塑性地震位移反应

大量研究（比如非弹性反应谱的研究）表明长周期单自由度体系的弹性地震位移反应和弹塑性地震位移反应近似相等。

关于长周期多自由度体系(高层结构属此类型)弹性和弹塑性地震反应关系研究并不多见。Gupta 和 Krawinkler (2000) 在框架结构地震位移估计一文中提供了一些非常有意义的结果。本文作者对该问题进行了专门研究(孙景江, 2004a; 2004b)。下面对两项研究成果进行简要介绍。

Gupta 和 Krawinkler 的文章选择了 9 栋钢框架结构, 进行了大量弹性和弹塑性地震时程反应分析, 提出了如何修正基于基本周期求出的谱位移反应, 从而得到结构的弹塑性总位移角和最大层间位移角。

9 栋结构中有的虽不属高层结构, 但基本周期都在长周期范围内。

该文研究表明对长周期框架型结构, 弹塑性位移反应的平均值小于弹性反应, 二者的比值平均为 0.7—0.8。

另外该文作者还研究了层间最大位移角与总位移角之间的关系, 得出二者的比值: 对低层结构可取 1.2; 中层结构可取 2.0; 高层结构可取 2.5—3.0, 但当地面运动特性较为特殊, 致使结构反应主要由高阶模态控制时, 二者关系统计结果离散较大, 不宜采用上述取值。

笔者的文章(2004b)选择了 2 栋经一定简化的实际钢筋混凝土高层结构, 输入 8 条不同场地上的典型地震动, 共进行了上千次不同地震强度下的时程反应分析。结果表明, 结构位移反应在不同地震动作用下, 表现有较大不同, 有时弹塑性反应大于弹性反应, 有时则相反。具体对总位移角而言, 弹塑性反应的平均值与弹性反应十分接近, 因此用后者估计前者是完全可行的。结构弹塑性最大层间位移角反应在弱和中等非线性阶段, 其平均值与弹性反应亦十分接近; 在强非线性阶段(当层间位移角大于 1/167 时), 其平均值大于弹性反应。通过数据拟合, 初步给出了一个强非线性阶段根据弹性最大层间位移角计算弹塑性最大层间位移角反应的估计公式:

$$\alpha_s = 0.42\alpha_e^2 + 0.59\alpha_e + 0.115$$

其中 α_s 和 α_e 分别代表弹塑性和弹性最大层间位移角反应值, 均以百分比表示。

1.4 结构地震反应分析常用软件

结构地震反应分析常用软件可以分为通用软件和专用软件, 前者不仅可用于土木工程受力分析, 还可广泛用于其它行业, 后者则一般专门用于土木工程之中。下面介绍几种国内外常用的结构地震反应分析程序。

1.4.1 SAP2000

SAP2000 程序是由 E.L. Wilson 等编制并由美国 CSI (Computer and Structure Inc.) 公司开发的结构分析专用计算程序。

SAP2000 程序具有十分强大的功能, 它可以分析模拟各种结构形式, 包括房屋建筑、桥梁、水坝、油灌、地下结构等。并对这些结构进行各种荷载包括地震作用下的弹性或弹塑性时程分析以及 pushover 分析等。

1.4.2 ETABS

ETABS 程序亦是由美国 CSI 公司开发的著名的高层建筑设计和分析专用软件, 它是在 TABS 程序基础上, 增加了求解空间框架和剪力墙的功能, 可以进行静载和地震荷载作用下的结构弹性或弹塑性反应分析。ETABS 在国外许多国家得到应用, 是应用最广泛的建筑结构分析软件。

1.4.3 PKPM

PKPM 是中国建筑科学研究院开发的高层建筑设计和分析专用软件。在我国得到非常广泛应用。其中最常用的分析模块是 SATWE, 特点是以板壳单元模拟剪力墙, 该单元由平面应力单元与板单元迭合而成, 因而既可以考虑平面内刚度, 又可以考虑平面外刚度。单元内的洞口采用自动细分单元后通过静力凝聚将内部自由度凝聚掉, 以保持有限出口自由度。板壳单元是模拟混凝土剪力墙的理想单元, SATWE 选用该单元并对墙开洞口作了自动处理是一项较为出色的功能。该软件建模自动化程度较高, 之后计算、校核、配筋以及设计图纸一条龙完成, 是在我国广泛应用的重要原因。

1.4.4 ANSYS

ANSYS 是由美国 ANSYS 公司开发的通用分析软件, 它能与多数 CAD 软件或有限元分析软件接口, 如 Nastran、Alogor、AutoCAD 等, 实现数据共享和交换, 并支持并行运算。它的分析计算模块包括结构分析(弹性及弹塑性)、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、电压分析以及多物理场耦合分析, 可模拟多种物理介质的相互作用, 具有灵敏度分析及优化分析能力, 后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可以看到结构内部)等图形方式显示出来, 也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。软件提供了 100 种以上的单元类型, 用来模拟工程中的各种结构和材料。

1.4.5 MARC

MARC 软件原为美国 MARC 公司的产品, 该公司创建于 1967 年, 它的创始人是美国著名的布朗大学教授, 有限元分析的先驱者 Pedro Marcel。MARC 公司致力于非线性有限元的研究, 非线性有限元软件的开发。1999 年 6 月, 美国 MSC 公司收购了 MARC 公司, 相应的将该软件更名为 MSC.Marc 软件。

MSC.Marc 是大型通用有限元软件, 具有极强的结构分析能力。可以处理各种线性与非线性分析, 包括: 线性/非线性静力分析、模态分析、简谐响应分析、频谱分析、随机振动分析、动力响应分析、静/动力接触、屈曲/失稳、失效和破坏分析等。MSC.Marc 还拥有 4 个库: 单元库、功能库、分析库、材料库。MSC.Marc 单元库提供了 157 种单元, 包括结构单元, 连续单元和特殊单元, 几乎每种单元都具有处理大变形几何非线性、材料非线性和包括接触在内的边界条件非线性以及组合的高度非线性的超强能力。

1.4.6 ALGOR FEAS (SAP91 或 Super SAP)

ALGOR FEAS 程序是由美国 ALGOR 公司推出的大型有限元通用分析程序。在国内, 人们习惯把 ALGOR FEAS 称为 Super SAP, 但实际上和 CSI 公司的 SAP 软件系列没有关系。该程序适合进行结构静、动力分析, 热传导分析、流体力学分析、电场分析、管道设计集成分析、机械运动仿真等。Algor 软件通过 Roadmap 把前处理(SuperdrawIII)、后处理(Superview)和分析模块紧密地联系在一起。在弹性分析方面, ALGOR 的功能应当说是比较完美的, 惟一不足的地方就是支座反力求起来不太方便, 需要加上 BOUNDARY 单元。在结构弹塑性分析方面, ALGOR 功能有限, 只能进行一些较简单的弹塑性反应分析。

1.4.7 MIDAS

MIDAS 是韩国浦项制铁集团开发的专用有限元分析软件, 它包括 MIDAS.CIVIL 和 MIDAS.GEN 两部分。MIDAS/Gen 是建筑结构分析与优化设计软件, 适用于建筑结构、工业

厂房、体育场馆等结构的分析与设计。除了一般的静力和动力分析之外, MIDAS/Gen 还可以进行施工阶段分析、几何非线性分析、时程分析、静力弹塑性分析、隔震和消能减震分析。MIDAS/Civil 则用于分析桥梁、大坝等。

1.4.8 DRAIN 系列程序

DRAIN-2D (Kannan 和 Powell, 1973) 是美国 70 年代编制的大型平面结构动力反应分析程序, 用于结构非线性地震时程反应分析, 在国内外研究中广泛应用。该程序提供 6 种单元: 桁架单元、梁与柱单元、半刚节点单元、填充墙(板)单元、梁单元和退化刚度梁单元。该程序功能比较单一, 仅能进行动力时程反应分析。前、后处理功能较弱, 输入结构信息和查找计算结果不方便。

DRAIN-2DX (Allahabadi 和 Powell, 1994) 是 DRAIN-2D 程序的提高版, 1986 年第一版, 后来修正某些错误, 并增加一些新的功能和单元形成 1993 年 1.10 版的 DRAIN-2DX 程序。该程序可以进行重力荷载作用下的弹性静力分析、任意结点荷载组合的非线性静力分析、地面运动(加速度或位移)作用下的非线性时程分析、自振特性分析、弹性反应谱分析、动结点荷载作用下的非线性动力反应分析。该程序共提供 12 种单元, 除了 DRAIN-2D 程序中已有的 5 种单元外, 还有裂缝-摩擦结点单元、弹性板单元、连接单元、销栓单元、退化摩擦结点单元、剪切摩擦结点单元和分层分片单元。

1.4.9 IDARC-2D

IDARC 程序 (Reinhorn, 1994) 是美国纽约州立大学推出的大型平面结构非线性反应分析程序, 于 1994 年推出了 4.0 版, 2002 年的 5.5 版, 以及最新的 6.0 版。其中, IDARC4.0 版应用最广泛。下面主要介绍 IDARC4.0 版。

IDARC4.0 程序的计算模型是一系列平行的平面结构和横向连梁组成。该程序提供柱单元、梁单元、剪力墙单元、墙边柱单元、横向连梁单元、转动弹簧单元、一维板单元和填充板单元。该程序可以进行结构地震荷载作用下的静、动力分析, 分析计算除了提供常规结果外, 还可以计算最大变形和能量损耗, 从而给出结构的破损指数。

2 结语

在多年结构抗震研究总结的基础上, 本文介绍并讨论了其中的一些基本问题, 希望读者在从事有关工作中能得到一点帮助。某些问题虽然提出, 比如地震安全性评价结果应用问题, 小比例尺高层结构地震模拟试验问题以及高层结构 pushover 分析(包括多振型 pushover 分析)等, 但认识是否正确? 解决途径是否可行? 希望得到进一步讨论, 以此促进结构抗震研究的进展。

参考文献

- 孙景江, 姚大庆, 王威, 2004a. 利用等位移原则估计高层结构的非弹性地震反应(一)、地震工程与工程振动, 24(4): 41—45.
- 孙景江, 王威, 姚大庆, 2004b. 利用等位移原则估计高层结构的非弹性地震反应(二)、地震工程与工程振动, 24(5): 39—45.
- 中华人民共和国建设部, 2001. 建筑抗震设计规范(GB50011-2001). 北京: 建筑出版社.
- Chintanapakdee C. and Chopra A. K., 2003. Evaluation of model pushover analysis using generic frames.

Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **32**: 417—442.

Gupta A. and Krawinkler H., 2000. Estimation of seismic drift demands for frame structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**: 1287—1305.

Newmark N.M. and Hall W.J., 1969. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities. Proc. 4th WCEE, Santiago, Chile, **2**: 37—80.

Sun Jingjiang, T. Ono, Zhao Y.G. and Wang Wei, 2003. Lateral load pattern in pushover analysis. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **2** (1): 99—107.

A Brief Discussion of Some Basic Problems in Earthquake Resistance of Structures

Sun Jingjiang

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080)

Abstract Some basic problems in the study of earthquake resistance of structures are introduced and discussed, including the ground motion input, earthquake simulation test of high rise buildings, main analytical methods and problems in seismic response analysis of structures. Finally, some analytical programs are briefly introduced.

Key words: Structure; Seismic response; Analytical simulation; Analytical program