DOI:10.19701/j.jzjg.2014.06.004

动力弹塑性分析在建筑抗震设计中应用的若干问题

王 森， 魏 琏， 孙仁范， 刘跃伟
（深圳市力鹏工程结构技术有限公司，深圳 518034）

[摘要] 动力弹塑性分析是大震作用下建筑结构抗震设计的重要分析方法。针对该方法在实际工程应用中存在的若干问题，如计算软件的选用、地震波的选择、计算模型和参数的合理选取、计算结果的判断等问题进行了深入讨论，并提出了相应的建议，可供读者在进行建筑抗震设计时参考应用。

[关键词] 动力弹塑性分析；地震波；抗震设计；薄弱层
中图分类号：TU313.2 文献标识码：A 文章编号：1002-848X(2014)06-0014-04

Application problems of dynamic elasto-plastic analysis in the seismic design of buildings

Wang Sen, Wei Lian, Sun Renfan, Liu Yuewei
(Shenzhen Li Peng Structural Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China)

Abstract: Dynamic elasto-plastic analysis is an important analysis method in seismic design of building structures under the rare earthquake. Some application problems in dynamic elasto-plastic analysis of practical projects were discussed, such as selection of calculation software and seismic waves, reasonable selection of calculation models and parameters, the judgment of calculation results. Relevant suggestions were proposed to provide reference for seismic design of building structures.

Keywords: dynamic elasto-plastic analysis; seismic wave; seismic design; weak story

0 引言

各国规范均对建筑抗震设计规定了多方面的抗震构造措施，其中大多构造措施的制定源于建筑物震害调查结果、构件破坏试验结果以及工程经验，缺乏量化分析。因此有必要对其进行进一步的理论分析和论证，以不断补充和改进相应的规定。其中，结构动力弹塑性分析方法的研究、发展和应用起到了关键的作用。我国对动力弹塑性分析方法的研究大致可划分为两个阶段。

第一阶段：从20世纪70年代末（唐山大地震后）至90年代初，主要进行了大量的钢筋混凝土构件试验，包括梁、柱、墙构件的恢复力特性试验，并编制了相应单质点结构、多层剪切型结构、多层框架结构、剪扭型结构的动力弹塑性分析软件[1]。同时通过对多层钢筋混凝土框架结构进行大量的动力弹塑性分析，发现结构可能存在薄弱层，提出了如下薄弱层弹塑性层间位移公式[2]：

$$\Delta u_p = \eta_p \Delta u_e \tag{1}$$

或

$$\Delta u_p = u\Delta u_y = \frac{\eta_p}{\xi_y}\Delta u_y \tag{2}$$

式中：Δu_p 为层间弹塑性位移；η_p 为弹塑性位移增大系数；Δu_e 为大震作用下按弹性分析的层间位移；Δu_y 为层间屈服位移；u 为楼层延性系数；ξ_y 为楼层屈服强度系数。

式(1)，(2)已纳入我国89版抗规[3]、2002版抗规[4]、2010版抗规[5]，并在工程实践中发挥了较大的作用。

第二阶段：21世纪初开始，由于美国等国家成功开发了一些适用于三维空间结构分析的静力和动力弹塑性分析软件，我国的工程师逐步开始学习、掌握这些软件，并大量应用于工程实践。通过对我国大量的超限高层和大跨建筑进行的动力弹塑性分析，找出结构的薄弱部位及构件、结构进入塑性后塑性变形和内力的发展过程、结构的耗能情况、震后结构的破坏状态及是否倒塌。并依据计算结果采取有针对性的抗震加强措施以提高结构抗震性能。但在应用国外软件的过程中，发现存在一些问题。

1 若干问题的探讨

1.1 计算软件的选用

现今，运用较为普遍的动力弹塑性分析软件主要有PERFORM-3D，MIDAS，LS-DYNA，ABAQUS等。分析软件对不同结构类型的结构构件分别采用如下计算模型：

(1)框架类结构。大震作用下进行动力弹塑性分析时，采用与小震、中震分析时相同的梁、柱模型。按纤维模型（塑性铰）进行弹塑性计算分析虽较精细，但大震作用下结构进入屈服后按纤维模型与按杆件模型的截面屈服判断不匹配，且尚无统一的判断标准。可以说，对框架类结构采用杆件模型的软

作者简介：王森，博士，高级工程师，Email：ws2001622@163.com。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

件进行分析是可行并且合理的。

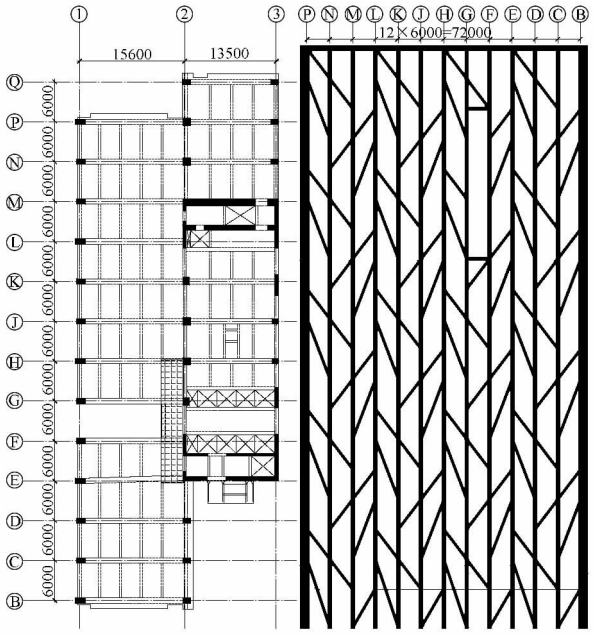
(2) 剪力墙、框剪、框筒等结构。剪力墙作为主要抗侧力构件，在大震作用下，其所受剪力的大小以及抗剪承载力的校核是检验结构抗震安全性的关键问题。现有的采用纤维模型处理剪力墙的软件，对如何判断剪力墙的抗剪屈服并没有明确规定。当某片剪力墙划分多个墙单元后，局部墙单元出现损伤并不能判断整片剪力墙是否出现问题。软件也没有给出大震作用下整片剪力墙的剪力及抗剪承载力验算结果，因而尚不能很好地满足大震作用下剪力墙抗震设计的要求。由此可见，采用纤维模型进行模拟的软件进行此类结构动力弹塑性分析时，尚需对剪力墙的抗震设计作必要的改进和补充。

(3) 采用纤维模型(分层壳模型)计算时，大震作用下剪力墙、楼板等混凝土构件受拉开裂，弹塑性模型与实际不完全相符，软件给出的某些计算结果在工程实践中发现尚存在疑问。

深圳某高 170m 的超高层工程，采用偏置筒体框架-剪力墙结构，结构平、立面见图 1。轴①立面采用复杂间断式斜撑框架。在中、大震作用下，偏置筒体的边墙出现较大拉力，美国 SOM 公司与深圳市力鹏工程结构技术有限公司分别采用相同 PERFORM-3D 软件进行动力弹塑性分析，均得到大震作用下筒体边墙底端拉力明显偏小的结果(小于中震作用结果)，采用其他软件复核时也出现同样问题，可以肯定软件给出的计算结果是有疑问的。由此可见，当出现此类问题时，应用现有软件计算结果时应特别谨慎，并应考虑采取其他解决措施，选用合理的计算模型，以保证结构的抗震安全性。

1.2 地震波的选用

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)[6](简称高规)第 4.3.5 条第 1 款规定，“应按建筑场地类别和设计地震分组选取实际地震记录和人工模拟的加速度时程曲线，其中实际地震记录的数量不应少于总数量的 2/3，多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符；弹性时程分析时，每条时程曲线计算所得结构底部剪力不应小于振型分解反应谱法计算结果的 65%，多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%”；第 4 款规定，“当取 3 组时程曲线进行计算时，结构地震作用效应宜取时程法计算结果的包络值与振型分解反应谱法计算结果的较大值；当取 7 组及 7 组以上时程曲线进行计算时，结构地震作用效应可取时程法计算结果的平均值与振型分解反应谱法计算结果的较大值”。



(a) 平面图　　(b) 轴①立面图

图 1　某超高层结构平、立面图

结构分析计算中执行上述规定时，发现主要存在以下问题：

(1) 选 3 组地震波取包络值或 7 组地震波取平均值，两者计算结果不一致，再换选 3 组或 7 组地震波的计算结果又会发生变化，可知分析结果不是确定性的，设计取舍没有依据。

(2) 对地震波的选用条件，结构底部剪力只限制了下限，未明确上限。设计时一旦计算结果超过较多，设计也难以确定取舍。

(3) 地震波是确定地震作用大小的设计依据，小震作用时以规范反应谱(或场地反应谱)为准、中震作用时一般也以规范反应谱为准、大震作用时输入地震波应与小震、中震的反应谱对应的地震作用相衔接。由于大震作用时结构部分构件进入塑性，反应谱和振型组合法已不适用而必须采用时程分析，因此提供一条相当于小震规范反应谱的大震输入设计地震波是当前必须解决的问题。

1.3 计算结果的判断

高规第 5.5.1 条第 7 款规定，“应对大震作用下计算结果的合理性进行分析和判断”，这一规定是正确的。目前，结构工程师常采用的判断方法基本上是一些定性判断，有时尚不足以得出完全正确的结论。建议宜增加一些判断计算结果正确性的措施：1) 弹性计算结果宜增加关键构件和敏感构件的内力比较；2) 采用与大震地震波不同加速度峰值，如中震和特大震加速度峰值进行计算，对相应的弹

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

塑性反应结果进行比较;3) 应严格对全过程进行分析校核;4) 采用两个不同软件计算以互相复核。

1.4 计算模型和构件弹塑性参数的应用

动力弹塑性分析前的弹性分析模型应与小震分析模型一致,并应与结构的实际状况相符合。结构构件塑性铰、材料的非线性特性、墙体的模拟、钢构件的受压失稳、钢筋混凝土构件受拉开裂、构件滞回曲线等弹塑性参数的选用应与实际相符。构件的截面尺寸、材料强度及配筋输入应与实际情况相符,不应作随意的假定。弹塑性计算模型和计算参数应与实际结构和构件状况相符。

2 多软件的算例比较

为核对大震作用下动力弹塑性分析结果的可靠性,采用两个或两个以上软件进行计算对比是有益的。通过对多个项目的动力弹塑性分析进行多软件计算的比较,可得出以下几点结论:

(1) 以某两个超高层框筒结构为例,算例 1 为深圳某 240m 的超高层建筑,结构形式为框架-核心筒结构。分别采用 PERFORM-3D,ABAQUS 和 LS-DYNA 三个软件进行了动力弹塑性分析[7]。计算结果表明三个软件计算得到的自振周期与振型吻合较好、整体反应指标基本吻合。PERFORM-3D 和 LS-DYNA 对框架梁和连梁的损伤判断较为一致,而 PERFORM-3D 和 ABAQUS 对框架柱和底部大支撑的损伤以及剪力墙中钢筋是否屈服的判断较为一致。但总体来看,各软件计算结果中构件的屈服顺序、部位、数量及破坏程度有较大的差异。算例 2 为重庆某 440m 的超高层建筑,分别采用 PERFORM-3D 和 LS-DYNA 两个软件进行了动力弹塑性分析的比较,比较结果也表明,结果的整体反应指标基本吻合,但构件的屈服损伤和破坏程度有较大的差异。由于以上软件尚未能对剪力墙的受力和相应破坏程度提供明确的结果,因此在工程应用上尚有不足。

(2) 算例 3 为深圳某 170m 超高层建筑(首层转换的剪力墙结构住宅),分别采用 PERFORM-3D 和 MIDAS/Building 两个软件对结构进行大震作用下动力弹塑性分析。经过仔细校核,二者的总体指标,如结构基底剪力、顶点位移及层间位移角等的计算结果尚较一致。图 2 ~ 4 分别给出两个软件的比较结果(图中 X,Y 向均分别指结构平面的开间和进深两个方向,余图同),但软件也未能对剪力墙所受的剪力、抗剪承载力和相应的破坏进行分析比较。

(3) 算例 4 为一座多层框架结构,采用 PERFORM-3D 和 MIDAS/Gen 的杆件模型对结构进行大震作用下的动力弹塑性分析,经过弹性阶段模型,构件弹塑性参数,构件截面、材料强度、配筋输入等严格的校核,图 5 ~ 7 分别给出两个软件计算得到的结构基底剪力、顶点位移及层间位移角对比,图 8,9 分别给出两个软件计算得到的首层框架柱塑性铰分布。由图可见,两软件计算结果包括受力、变形及进入屈服后的破坏状况均较为一致。

综上所述,算例 1,2 均为以剪力墙抗侧为主的

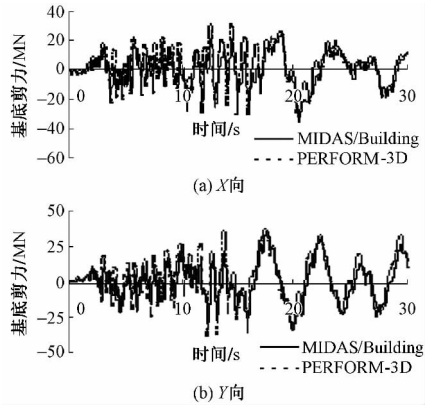


图 2 两个软件计算得到的基底剪力对比

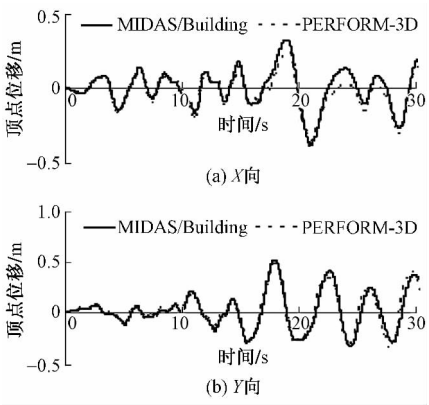


图 3 两个软件计算得到的顶点位移对比

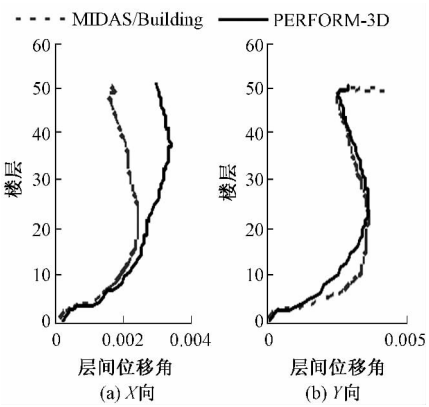


图 4 两个软件计算得到的层间位移角对比

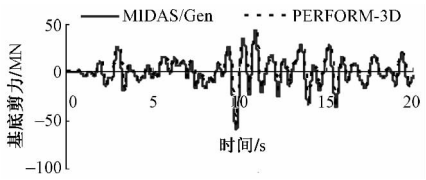


图 5 两个软件计算得到的 Y 向基底剪力对比

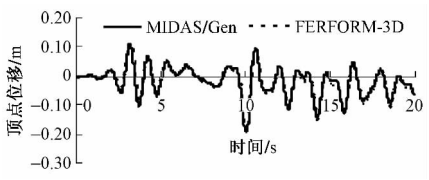


图 6 两个软件计算得到的 Y 向顶点位移对比

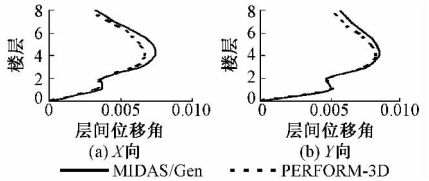


图 7 两个软件计算得到的层间位移角对比

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

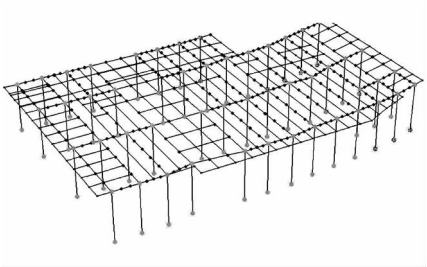


图 8　PERFORM-3D 软件计算得到的首层框架柱塑性铰分布图

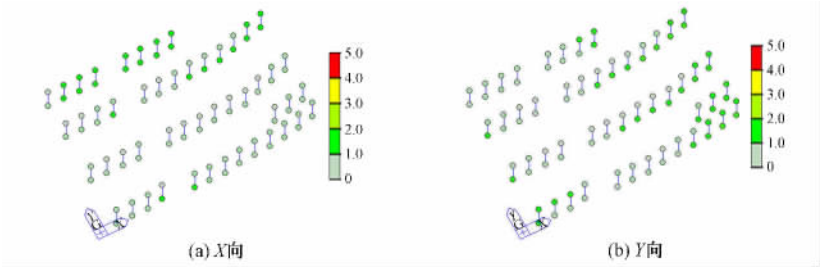


图 9　MIDAS/Gen 软件计算得到的首层框架柱塑性铰分布图

高层结构,动力弹塑性分析较为复杂,计算分别由不同单位的结构工程师独立进行,未能在计算全过程中进行相互核对,以致所采用的计算模型、构件弹塑性参数及配筋输入等均有一定差别,最终计算结果表明代表结构整体指标的基底剪力和结构位移较接近,但构件的屈服情况及进入塑性程度均有较大差别。算例 3 由深圳市力鹏工程结构技术有限公司独立组织计算,全过程计算均进行较严格复核,情况略有改善,但构件的屈服情况仍有相当差别,且对剪力墙的受剪和相应破坏不能进行比较。算例 4 在深圳市力鹏工程结构技术有限公司计算时,强调从弹塑性分析的杆件参数输入开始均严格要求一致,计算结果表明两个软件的弹塑性地震反应计算结果相当接近,可以起到相互校核的作用。

3　结论

(1) 经验表明,目前国内应用较多的 ABAQUS,PERFORM-3D,MIDAS,LS-DYNA 等软件,当弹塑性计算模型符合实际、弹塑性参数取用正确时,其应用于大震作用下结构的动力弹塑性分析时所提供的计算结果基本上是可信的,但尚需对剪力墙的抗震分析作进一步的改进。

(2) 对框架类结构,采用以杆件模型的软件可以得出满足工程应用精度的计算结果。

(3) 当弹塑性计算模型出现与实际情况不符、取用弹塑性参数不妥时,以上各动力弹塑性分析软件给出的某些计算结果可能是不可信的,有的甚至可能是偏于不安全的,使用时应充分注意。

(4) 应努力开发我国自己的动力弹塑性分析软件,要求做到模型合理,计算结果可靠,并具有较好的前、后处理功能,方便设计应用。实践中通过对超限高层建筑进行动力弹塑性分析,在不断提高抗震设计水平和质量的同时,发现的问题也为改进现有软件提供充分有效的信息。

(5) 各国规范关于抗震构造措施的规定多源于地震震害调查结果和结构构件的破坏试验,理论分析和论证是不够的。如框剪结构、框筒结构中柱剪力分配计算方法的规定;不同地震烈度下,结构柱、墙轴压比的规定等都需要进一步研究解决。应运用动力弹塑性分析方法对有关规定进行研究和论证,提出更为合理的建议和规定,以期不断完善抗震设计技术。

参　考　文　献

[1] 魏琏,戴国莹. 唐山地震作用下一座三层钢筋混凝土框架结构倒塌的分析[J]. 地震工程与工程振动,1981,1(1):34-40.

[2] 魏琏. 建筑结构抗震设计[M]. 北京:万国学术出版社,1991.

[3] GBJ 11—89 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.

[4] GB 50011—2002 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[5] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[6] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[7] 刘畅,段小廿,魏琏,等. 某超限高层结构多软件弹塑性时程分析对比[J]. 建筑结构,2012,42(11):35-39,18.

(上接第 50 页)

工程中的梭形柱以及钢结构屋顶已经安装完毕,经现场实际测量,屋顶最大竖向变形约为 20mm,经过起拱处理,安装完成后屋面板整体接近水平。这说明梭形柱是安全可靠的,文中采取的计算措施对相似工程有借鉴意义。

参　考　文　献

[1] 郭彦林,邓科,林冰. 梭形柱的稳定性能及设计方法研究[J]. 工业建筑,2007,37(7):92-95.

[2] 邓科,郭彦林. 轴心受压梭形变截面钢管格构柱的弹性屈曲性能[J]. 工程力学,2005,22(5):31-37.

[3] 北京市建筑设计研究院. 建筑结构专业技术措施[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net