

# 某超限高层结构的多程序弹塑性时程分析对比

刘畅<sup>1</sup> 段小甘<sup>2</sup> 魏 璘<sup>1</sup> 王 森<sup>1</sup> 王志远<sup>1</sup>

(1 深圳和致达建筑工程结构技术有限公司 2 奥亚纳工程咨询)

**【摘要】** 复杂的超限高层建筑结构需要进行弹塑性分析和计算来验证“大震不倒”的设防要求。以深圳某复杂超限高层建筑工程为背景,对其进行弹塑性时程分析,研究该结构在地震下的抗震性能。该工程曾用 Perform-3D、Abaqus 和 Ls-DYNA 进行动力弹塑性时程分析。本文对三个程序得到的结构在罕遇地震作用下的整体反应指标和构件损伤情况进行了对比,结果表明,三个程序得到的整体反应计算结果基本吻合。

**【关键词】** 超限高层 弹塑性时程分析 抗震性能 罕遇地震

## 0 前言

该工程是位于深圳市市民中心的一栋公共建筑,建筑面积 18 万平方米,建筑总高 239m,地下 3 层地上 46 层,塔楼平面尺寸为 54m × 54m,在 7 层至 10 层(标高 38.7m~63.1m)从塔楼外伸大悬臂, x 向两侧外伸 54m, y 向两侧外伸 22m,形成 162m × 98m 的大悬臂裙楼, x 向外伸 18m 处设支撑一道以支撑裙楼的竖向荷载。整体结构体系可以认为由三部分构成:(1)塔楼部分为框筒结构,由核心筒和外围框架构成,而框架梁柱大都为型钢混凝土或钢管混凝土组合构件;(2)大悬臂裙楼部分为钢桁架体系;(3)底部支撑则由钢管混凝土和钢桁架构成。

根据《高规》的规定, B 级高度钢筋混凝土框架—核心筒最大适用高度为 180m, B 级高度筒中筒最大适用高度为 230m, 钢—混凝土组合结构最大适用高度 190m。因此该工程成为超限高层建筑结构。另外该工程在 7 层到 10 层的大悬臂结构,也是现行规范没有涵盖的。为了检验该结构在罕遇地震作用下是否满足“大震不倒”的抗震设计要求,有必要对其进行弹塑性时程分析,验算弹塑性层间变形,判断主要抗侧力的屈服顺序和损伤程度,根据构件破坏顺序研究结构的屈服机制,对结构在各级地震下的整体抗震性能做出综合评估。

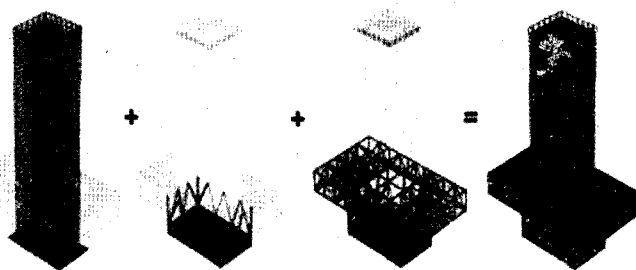
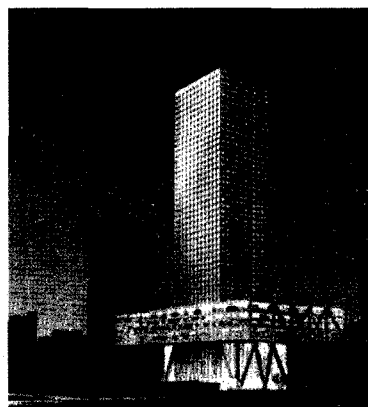


图 1 结构体系示意图

该工程曾用三个程序进行了弹塑性时程分析,分别是三维结构非线性分析软件 Perform-3D、通用非线性有限元分析软件 Abaqus 和 Ls-DYNA。Perform-3D 的前身是美国加州伯克利大学 Powell 教授开发的 Drain-2D 和 Drain-3D 程序,这是国际抗震工程研究领域较为认可且应用较多的程序,体现了“基于性能的抗震设计”的思想,能够实现基于 ATC-40 和 FEMA-440 对结构进行抗震性能评估。Abaqus 是通用

刘畅,男,深圳和致达建筑工程结构技术有限公司

地址:深圳市福田区中审大厦 8 楼

邮编:518034

有限元软件，具有丰富的单元库和模型库和强大的非线性分析能力，在航空汽车石油等众多领域的有广泛的应用，在我国用 Abaqus 进行建筑结构的弹塑性时程分析得到了工程界的重视<sup>[4]</sup>。Ls-DYNA 是著名的通用有限元程序，Arup 在国内有过多项重要工程应用的经验，本文涉及的 Ls-DYNA 计算结果是引用自 Arup 为该工程提供的相关资料。

### 1 模型与相关参数

#### 1.1 整体模型

Perform-3D、Abaqus 及 Ls-DYNA 分别建立了空间分析模型，并采用了以下相同的基本假定：

- (1)模型不包括地下室，地面作为结构嵌固端；
- (2)塔楼范围内核心筒与外框架之间框架梁端为铰接，外框架内梁端为刚接；
- (3)大悬臂结构的大桁架结构与塔楼的连接以及相互连接均按刚接处理
- (4)按照 100% 恒载和 50% 活载作为地震计算质量，Perform-3D 模型地震计算质量为 29.1 万吨，Abaqus 模型地震计算质量为 29.4 万吨，Ls-DYNA 模型地震计算质量为 29.1 万吨，三者十分接近。

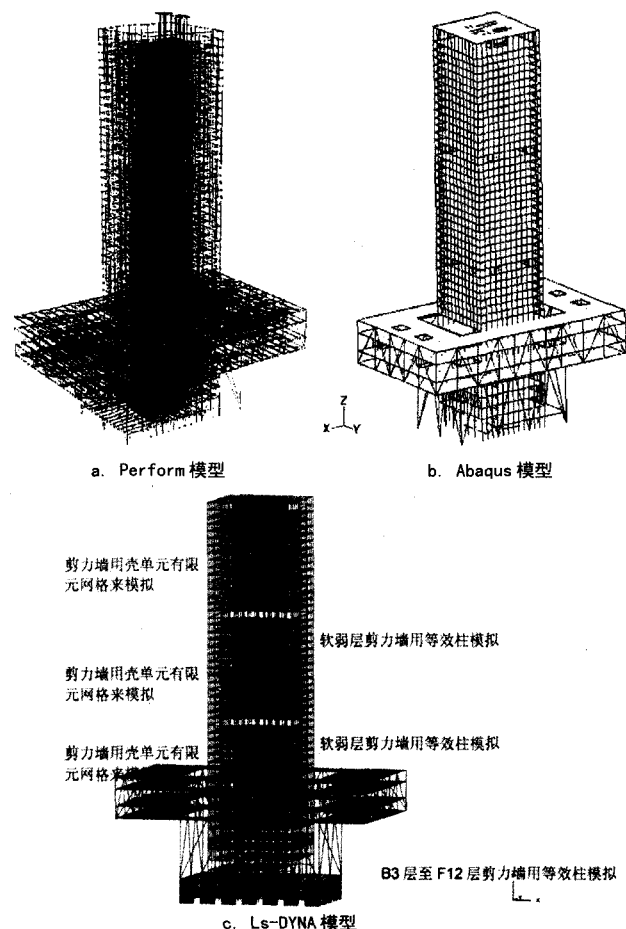


图2 整体模型

主要抗侧力构件模型的对比 表1

	Perform-3D	Abaqus	Ls-DYNA
计算地震质量	290,960 ton	294,000 ton	290,800 ton
剪力墙模型	轴向和弯曲变形用塑性纤维模型模拟；剪切变形则定义弹塑性剪切滞回模型模拟；不考虑出平面弹塑性性质	采用弹塑性壳元 (S4R) 模拟	F12 以下和两个设备层用等效非线性梁柱单元 (集中塑性铰) 模拟，主要考虑其弯曲变形；其他部分用弹性壳元模拟
框架梁柱	弹性杆加杆端塑性铰模型，其中塑性铰模型为弯矩-曲率格式，考虑塑性变形分布长度，柱端考虑轴力与双轴弯矩耦合作用	钢管混凝土柱用自定义梁单元定义；型钢混凝土柱用复合材料构成的梁单元模拟	梁的塑性变形集中于梁端弯曲铰，柱的塑性变形集中于柱端压弯塑性铰
连梁	弹性杆加弯曲塑性铰和剪切塑性铰	采用壳元模拟	弹性杆加梁端弯曲塑性铰

#### 1.2 构件模型

(1)剪力墙：Perform-3D 和 Abaqus 对所有剪力墙单元均考虑其弹塑性性质，前者用纤维模型和剪切材料分别考虑压弯和剪切性质，后者则以弹塑性壳元做综合考虑。Ls-DYNA 假定结构底部和两个薄弱层 (设备层) 为可能出现塑性变形区域，以等效弹塑性梁柱单元模拟，其余部分用弹性壳元假定；

(2)框架梁柱：Perform-3D 和 Ls-DYNA 用弹性杆加塑性铰模型模拟，不同之处在于前者用弯矩一曲率格式考虑塑性铰长度，而后者假定塑性铰集中到杆端。Abaqus 用自定义的梁端元来等效模拟构成复杂的钢管混凝土构件；

(3)连梁：Perform-3D 和 Ls-DYNA 用弹性杆加塑性铰模型模拟连梁，而 Abaqus 用弹塑性壳元模拟；

(4)三者对主要抗侧力构件的模型采用了不完全相同的假定和条件，在本文中将通过对比来验证这些假定是否合理。

#### 1.3 塑性铰的定义

Perform-3D 用杆件加端部塑性铰来模拟梁柱构件是满足工程精度要求的简化模式。梁端弯曲铰可以直接根据截面尺寸和配筋率计算得到相应的屈服弯矩和对应屈服曲率，而框架柱的受力比较复杂因此采用考虑轴力与双轴弯矩耦合作用的 P-M-M 铰模拟 (如图 4 示)。

#### 1.4 材料本构关系

无论是 Perform-3D 的纤维模型还是 Abaqus 的弹塑性壳元，其弹塑性性质都将归结为材料的本构关系。

纤维模型是通过组成结构截面的纤维束上的应力

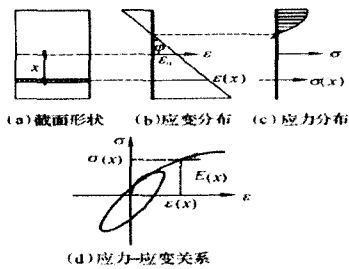


图3 纤维模型示例

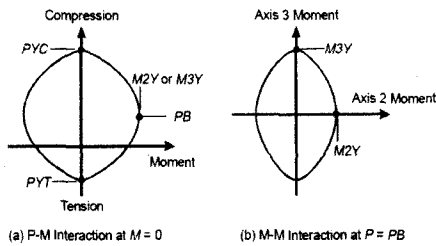


图4 轴力和弯矩耦合的P-M-M 较

应变进行积分而得到构件上的力(弯矩和轴力)和变形(曲率和轴向变形)的分布,因此构件的弹塑性性质归结于纤维的单轴应力应变关系(如图5示)。Perform-3D模型中钢筋材料采用理想弹塑性模型,不考虑钢筋硬化和循环过程的退化;混凝土材料采用三线性模型,通过控制再加载路径体现了循环过程中耗能能力的退化。Abaqus模型中钢材和钢筋采用等向强化二折线模型,强化段 $E' = 0.01E$ ,采用Mises屈服准则,等向强化;混凝土材料用《混凝土结构设计规范》附录C的应力-应变关系作为骨架线,并考虑了滞回过程的刚度退化(如图6示)。

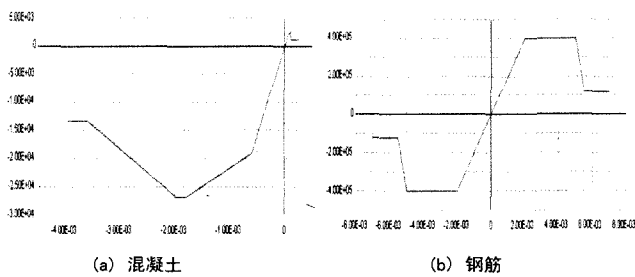


图5 Perform-3D的材料应力应变关

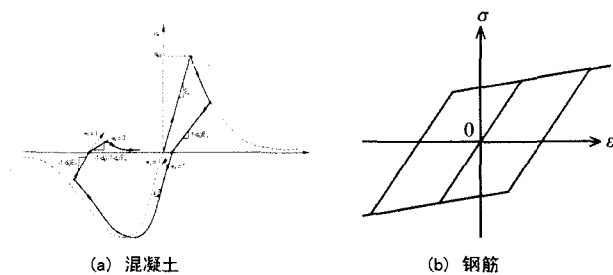


图6 Abaqus材料的应力应变关系

### 1.5 阻尼

阻尼比的取值, Perform-3D、Abaqus 和 Ls-DYNA 均取阻尼比为 0.05, 其中 Perform-3D 是用 Rayleigh 阻尼来形成阻尼矩阵, 在定义相关系数时即考虑了高阶振型的影响(使 0.2T1 对应阻尼比为 0.05), 也考虑了进入弹塑性状态之后周期变长的作用(使 1.25T1 对应阻尼比为 0.05)。

### 1.6 输入地震波

该结构场地为 7 度设防要求, Perform-3D、Abaqus 和 Ls-DYNA 均采用安评报告提供的大震的修正天然波作为地震输入(共 3 组 9 条)。不同之处在于 Perform-3D 将一组两条水平波和一条竖向波同时输入, Abaqus 和 Ls-DYNA 将一组中一条水平波按 y 向 x 向 1: 0.85 比例加竖向波同时输入。图 7 为其中一组, x 向 y 向和竖向地震波峰值加速度分别是 0.213g, 0.212g 和 0.156g, 考虑到结构自振周期超过 5s, 取地震波持时均为 40s。

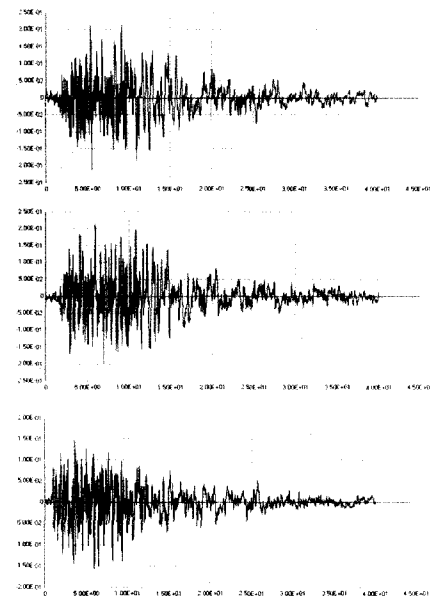


图7 输入地震波(x向、y向及竖向)

### 2 动力特征

进行弹塑性时程分析之前进行振型分析,一方面可以验证模型是否准确,一方面也可以对结构基本动力特性作初步的判断。结合弹性分析用到的 Etabs 和 Midas 计算得到的振型和周期,把前几阶的结果列在表中。Perform-3D 计算得到的前 6 阶振型如图 8。值得注意的是, Midas 第 10 振型(T10=0.69s)和第 15 振型(T15=0.55s), 相应的 Perform-3D 的第 11 振型(T11=0.69s)和第 16 振型(T16=0.55s)为大悬臂竖向振动振型。

不同软件计算的前6阶振型 表2

周期 (s)	T1	T2	T3	T4	T5	T6
MIDAS	5.12	4.94	3.47	1.61	1.60	1.48
ETABS	5.07	4.90	3.67	1.63	1.62	1.44
ABAQUS	4.87	4.54	3.03			
Perform-3D	5.09	4.97	3.44	1.68	1.65	1.39
Ls-DYNA	4.90	4.62	3.39	1.73	1.66	1.60

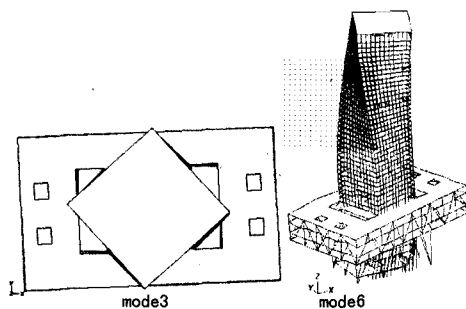


图9. Abaqus计算的振型

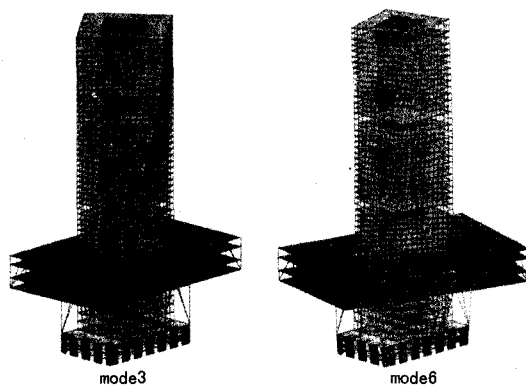
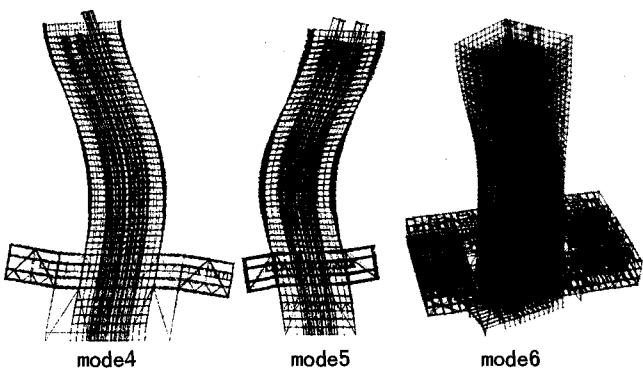
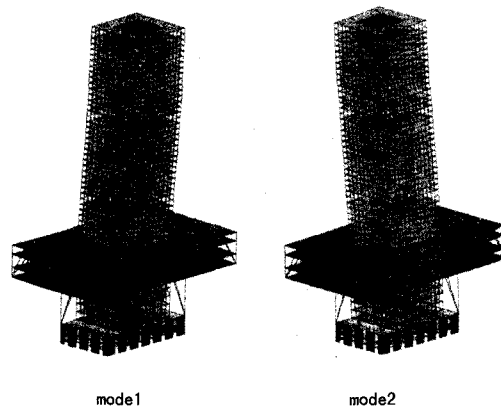
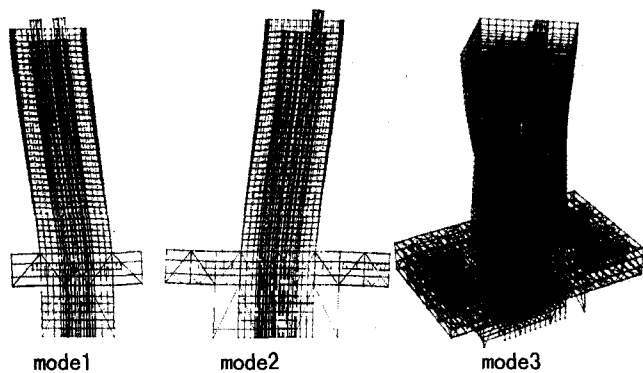


图10. Ls-DYNA计算的振型

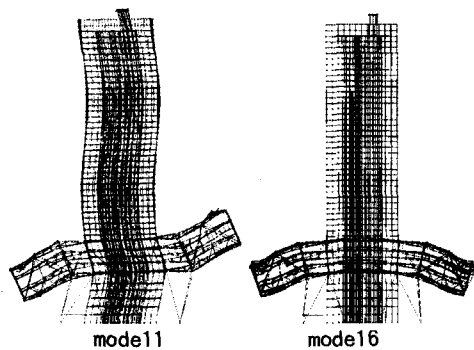
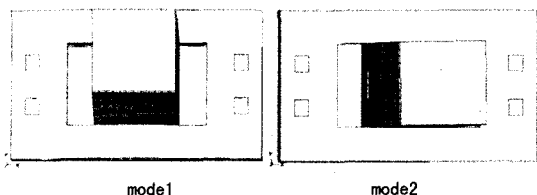


图8. Perform计算的振型



### 3 罕遇地震下的整体反应指标

整体反应指标可以帮助我们判断结果是否可信，判断结构进入弹塑性状态的程度。结果表明 Perform-3D、Abaqus 和 Ls-DYNA 的整体反应结果吻合较好，如表3所示。

### 4 罕遇地震下的构件损伤情况

“大震不倒”是抗震设计的基本要求，规范要求通过验算结构的弹塑性变形来判断结构是否满足这一要求。弹塑性时程分析除了计算整体反应指标之外，还可以给出各构件在地震输入过程中的力和变形发展的全过程，给出构件破坏的性质、分布、程度和形成屈服机制的顺序，这些信息提供了更详细

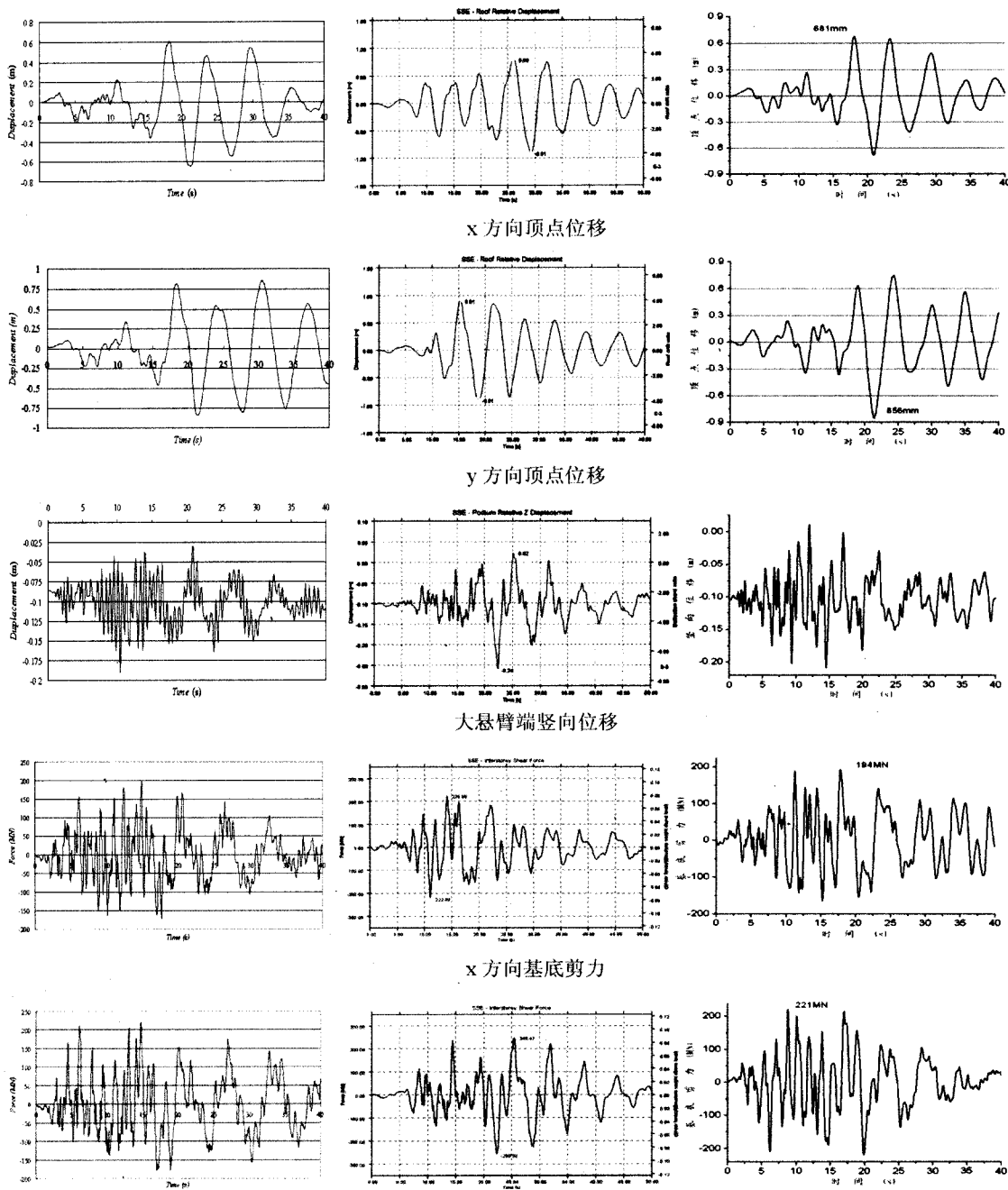


图 11 Abaqus 整体反应结果

图 12 Ls-DYNA 整体反应结果

图 13 Perform-3D 整体反应结果

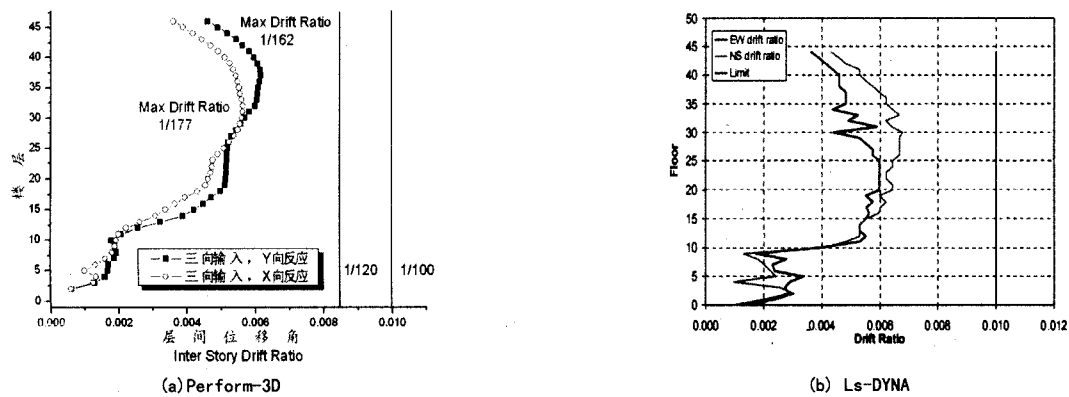


图 14 最大层间位移角

整体反应指标的对比 表3

整体反应指标	最大顶点位移及残余变形(mm)		最大层间位移角及发生楼层(rad)		最大基底剪力(MN)		大悬臂最大竖向位移(mm)
	x向	y向	x向	y向	x向	y向	竖向
Abaqus	630(35)	850(425)	1/217(F34)	1/158(F32)	199	222	86-193
Perform-3D	681(34)	856(335)	1/177(F30)	1/162(F35)	194	221	95-182
Ls-DYNA	910(370)	910(120)	1/167(F20)	1/143(F30)	225	259	100-210

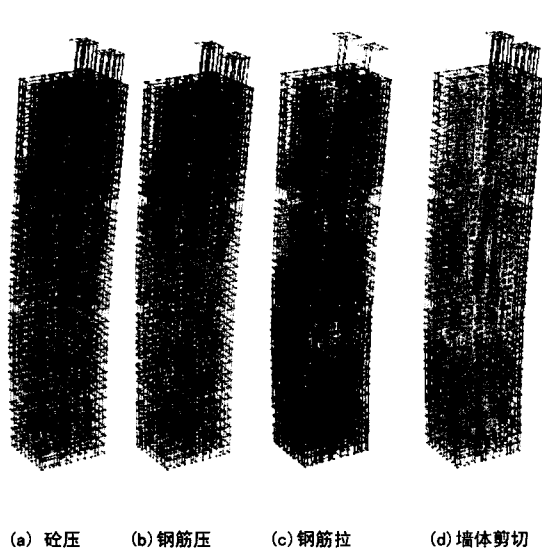


图15 核心筒墙体损伤分布(Perform-3D)

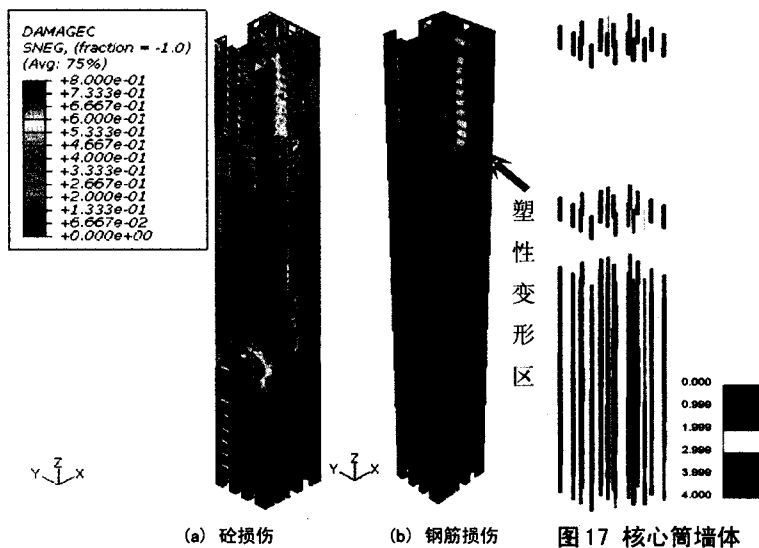


图16 核心筒墙体损伤分布(Abaqus)

图17 核心筒墙体损伤分布(Ls-DYNA)

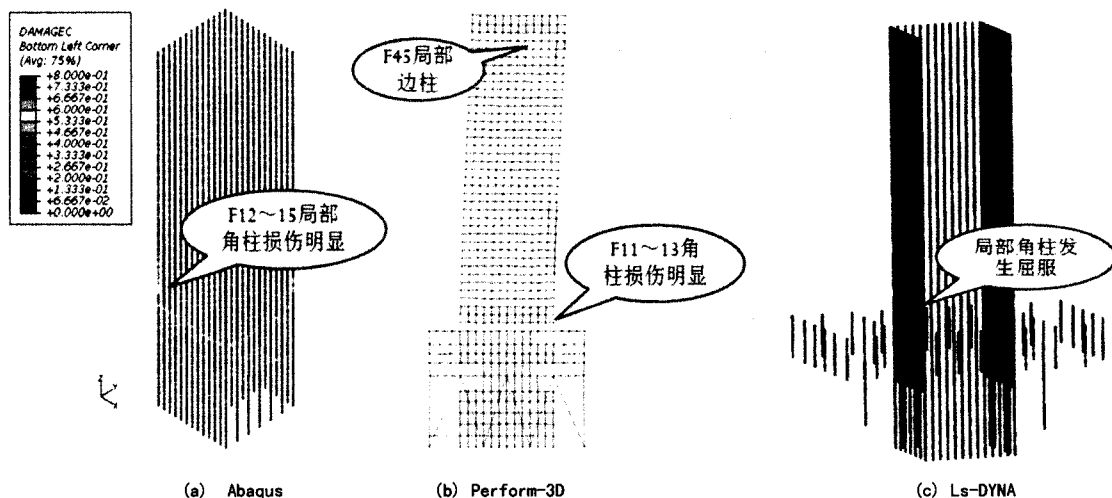


图18 框架柱损伤分布

的结构在大震反应的过程和特征，能够为改进设计提供依据。在“基于性能的抗震设计”的体系中，对构件损伤的评估是作为结构抗震性能评价的重要指标。根据所建模型的特点，按照以下标准分别判断构件损伤情况：(1) Abaqus 标准：受拉时以钢筋屈服点为基准，受压时以混凝土抗压强度为基准，桁架以塑性变形值为标准；(2) Perform-3D 标准：剪

力墙弯曲检查砼和钢筋的材料应变，剪力墙剪切检查剪切应变，梁柱检查塑性铰曲率，桁架检查轴向应变，楼板检查平面内应力；(3) Ls-DYNA 标准：检查塑性铰最大转角。

### 5 结论

(1) Perform-3D、Ls-DYNA 和 Abaqus 三个程序计算得到的自振周期与振型吻合较好；

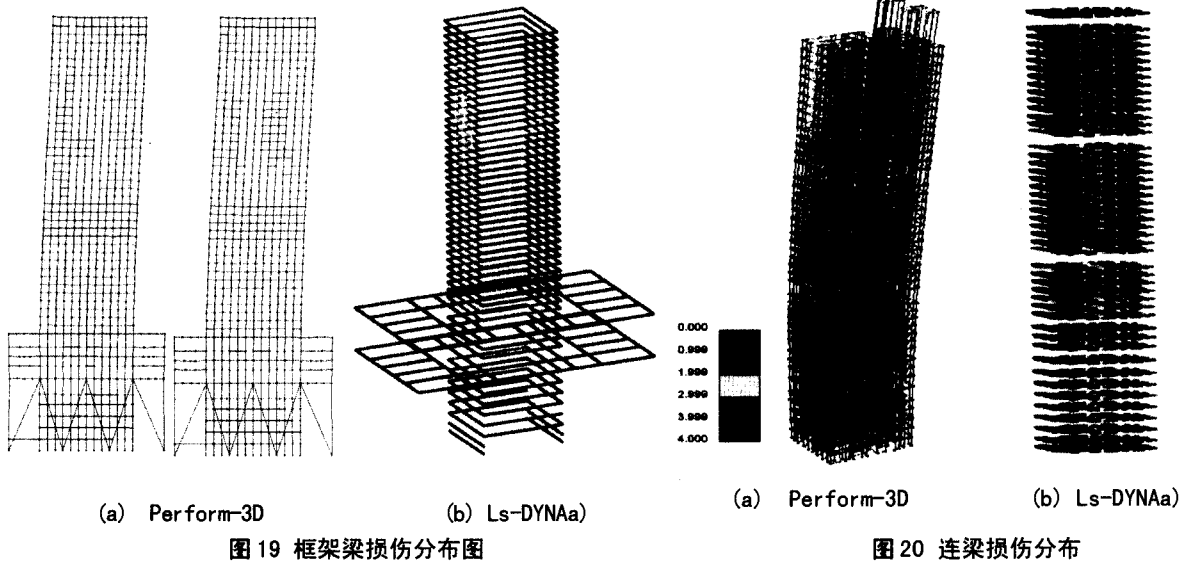


图19 框架梁损伤分布图

图20 连梁损伤分布

构件层次上的损伤情况对比

损伤性质	Perform-3D	Abaqus	Ls-DYNA
核心筒混凝土(压应变)	大悬臂以下楼层最大压应变为 0.53 倍极限压应变	F11~F13 核心筒受压损伤明显	
核心筒钢筋(拉压屈服)	F11-F15、F30 及相邻层、顶部数层墙体拉应力较大, 钢筋最大拉应变为 0.6 倍屈服应变; 结构底部未出现拉力	墙肢部分未出现钢筋屈服	核心筒底部数层, 大悬臂上下数层以及两个设备层, 部分剪力墙肢屈服形成塑性铰
核心筒剪力墙的剪切	大悬臂以上数层和顶部部分墙肢剪切应变较大, 但未发生剪切破坏	顶部数层因剪力较大而产生混凝土明显损伤	
框架柱(PMM角)	F11-13 层角柱和 45 层个别柱损伤较大(未屈服), 其余为弹性状态	F12-F15 局部角柱损伤明显(未屈服), 其余为弹性状态	F11 层塔楼外框筒 4 角柱发生屈服, 其余为弹性状态
框架梁(弯曲塑性铰)	F11 角部和中上部楼层东西里面部分框架梁端出现弯曲塑性铰, 其余为弹性状态	所有框架梁为弹性状态	F11 及东西里面局部出现梁端塑性铰, 其余为弹性状态
连梁	大部分连梁形成弯曲塑性铰	F30 以上 y 向墙体局部(连梁部分)出现钢筋屈服	大部分连梁形成弯曲塑性铰, 最大铰转角发生在两个设备层
底部大支撑(压应力)	最大压应力为 183Mpa, 未形成屈曲	最大压应力为 174Mpa, 未形成屈曲	有屈曲发生, 但强度下降有限, 残余强度仍可保证重力荷载下结构不倒塌

(2) 三个程序计算得到的整体反应指标是基本吻合的。以 y 向的最大基底剪力、层间位移角和顶点位移为指标, Abaqus 结果与 Perform-3D 几乎一致, Ls-DYNA 相差分别为 17.2%、8.8% 和 6.3%;

(3) 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;

(4) 三个程序计算结果一致表明, 该结构能够满足“大震不倒”的设防要求。

随着计算机运算能力的增强和分析手段的完善, 已经具备了对复杂高层结构进行弹塑性时程分析的条件。然而这方面的工程实践经验仍显不足, 考虑到弹

塑性时程分析的复杂性, 在条件允许时可以通过不同的软件用不同模型进行计算和对比, 以求得到更为可靠和准确的结果。

附: 本文得到了深圳市电子设计院王庆扬、陈志强、王传甲三位总工的帮助和指导, 提供了宝贵意见, 在此表示感谢。

参考文献

[1] JGJ3-2002, 高层建筑混凝土结构技术规程[S], 中国建筑工业出版社  
 [2] Perform-3D user guide version4 [M], CSI  
 [3] Perform component and element[M], CSI  
 [4] 王传甲, 陈志强等, 通用有限元软件 Abaqus 在动力弹塑性时程分析上的应用[J], 建筑结构, 2006(36) ■