

对复杂结构采用不同软件计算的对比分析

夏锋林

杭州市建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年2月28日; 录用日期: 2023年3月20日; 发布日期: 2023年3月30日

摘要

规范要求复杂结构应采用不少于两个不同的力学模型进行计算分析, 本文结合某实际工程, 采用YJK、Etabs、midas Building三种软件, 分别对其进行了多遇地震作用下的振型分解反应谱法分析, 并对计算结果进行比较。通过对比可得出, 针对本工程该三种软件计算得到的各项指标基本接近, 但某些指标也存在一定的差异, 如振型等, 本文同时也分析了引起某些差异的原因, 并给出了解决办法。

关键词

复杂结构, 结构分析软件, 振型分解反应谱分析, 计算结果比较

The Comparison and Analysis of Different Software Calculation of Complex Structures

Fenglin Xia

Hangzhou Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 28th, 2023; accepted: Mar. 20th, 2023; published: Mar. 30th, 2023

Abstract

According to the code, no less than two different mechanical models should be used to calculate and analyze complex structures. In this paper, combined with a practical project, the mode decomposition response spectrum under the frequent earthquake is analyzed by using YJK, Etabs and midas Building, and the calculated results are compared. Through the comparison, it can be concluded that the indexes calculated by the three kinds of software in this project are basically similar, but some results are also different in some indexes, such as mode shape, etc., this paper also analyzes the causes of some differences, and gives solutions.

Keywords

Complex Structures, Structural Analysis Software, Mode Decomposition Response Spectrum Analysis, Comparison of Calculated Results

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国是一个多地震的国家,地震分布广泛,而合理的建筑形体和布置在抗震设计中是头等重要的,建筑设计提倡平、立面简单对称[1],但随着我国经济和技术不断发展、城市建设规模的不断扩大,建筑使用功能越来越多元化,建筑师对建筑立面、体型及平面布置的设计也越来越丰富,使得体型复杂、不规则的结构逐渐增多。我国设计规范要求,复杂结构在进行多遇地震作用下的内力和变形分析时,应采用不少于两个合适的不同力学模型,并对其计算结果进行分析比较[1],对高层建筑体型复杂、结构布置复杂时,应采用至少两个不同力学模型的结构分析软件进行整体计算[2]。

目前,常规的结构设计计算软件有国产的 PKPM、YJK、3D3S,以及韩国的 midas 系列软件,美国 CSI 公司研发的 Etabs、SAP2000 等。PKPM 和 YJK 是我国多高层结构设计中使用较多的设计软件,两者计算内核基本相同,3D3S 广泛用于钢结构设计;midas 系列软件主要有 Gen、Building、Civil 等,Gen 是通用的空间有限元结构分析与设计系统,可综合处理有层和无层的结构类型,Building 和 PKPM、YJK 的使用场景几乎一致,一般用于多高层的结构分析设计,Civil 主要用于桥梁结构设计;Etabs 和 SAP2000 是 CSI 公司出品的经典软件,是国际通用的结构设计软件,Etabs 一般用于多高层,SAP2000 一般用于空间钢结构。

采用不同软件对结构进行计算,其计算结果间的差异国内已有文献进行了对比[3][4],但也存在一定的不足,本文结合某实际超高层建筑工程,采用 YJK、Etabs、midas Building 三种分析软件,分别进行多遇地震下的振型分解反应谱分析,并对其计算结果进行比较,同时分析引起某些差异的原因,给出解决办法。

2. 工程概况

本工程位于浙江省杭州市,地上 32 层,主要屋面结构标高 148.1 m,地下设置满堂三层地下室。结构体系为框架-核心筒结构,且外框柱内设置十字 H 型钢,嵌固端取地下室顶板。建筑东西外立面轮廓竖向呈腰部内凹的曲线形,南北外立面轮廓竖直,建筑效果图如图 1 所示,因此南北侧的外框柱按建筑立面线形布置为斜柱,东西侧的中间外框柱均为普通竖直框架柱。

本工程抗震设防烈度为 6 度,设计基本地震加速度为 0.05 g,设计地震分组第一组。建筑场地土类型为中软土,场地类别为 III 类,特征周期为 0.45 s,抗震设防类别为标准设防类。基本风压 0.45 kN/m²,风荷载体型系数取 1.4,地面粗糙度类别按 B 类。

本工程结构存在以下不规则项:楼板大开洞、斜柱、相邻楼层受剪承载力突变。因此,本工程属特别不规则结构,为超限高层建筑。

3. 多遇地震下振型分解反应谱法分析

高度超过 100 m 的高层建筑结构应采用考虑扭转耦联振动影响的振型分解反应谱法进行计算分析[2],

本文运用 YJK、Etabs、midas Building 三种计算软件,采用考虑扭转耦联振动影响的振型分解反应谱法对结构进行多遇地震作用下的弹性分析。



Figure 1. Building rendering
图 1. 建筑效果图

分析时,三种软件计算模型的输入参数相同,但不同软件对某些参数的取值、荷载的计算、单元的处理、结果的整理等存在不同方法,如圆形、H 型等特殊构件有效剪切面积的取值,三种软件算法不同,从而带来构件刚度的计算偏差,对剪切模量的计算, midas Building 与 YJK 按规范取值, Etabs 按理论公式计算,两者误差 1%左右,对风荷载和地震作用的计算, midas Building 与 YJK 取整层范围作用在该楼层,而 Etabs 计算风荷载时取上下楼层各一半,计算地震作用时则按空间分布进行计算,另外,对剪力墙的处理,三种软件均按壳元墙元模型,但单元的长宽比、规则性、细分尺寸等对三者的影响各不相同,以上种种因素,均会导致三种软件的计算结果存在差异。

以下将针对结构在各种效应作用下的整体性能指标,如质量、周期、振型、层剪力、倾覆力矩、刚度分布、扭转位移比、位移角等,对三种软件的计算结果进行比较分析。计算结果中,层号均为计算模型中的层号,计算结果比较的差值百分比均以 YJK 作为比较对象,记为 Δ ($\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 分别为 Etabs、midas Building 的差值百分比)。

3.1. 楼层质量

各层结构质量对比详见表 1,楼层质量分布如图 2 所示,可见三种计算模型的楼层质量分布基本一致,楼层质量也比较接近,且 midas Building 更为接近 YJK,偏差不超过 2%,Etabs 偏差略大一些,这是因为 Etabs 中楼层质量是取本楼层的上半楼层以及下半楼层的质量,然后集中在本楼层上,而 YJK 取整层质量集中于层顶。

Table 1. Comparison of storey mass (t)
表 1. 楼层质量对比(吨)

层号	YJK	Etabs	$\Delta 1$	midas	$\Delta 2$	层号	YJK	Etabs	$\Delta 1$	midas	$\Delta 2$
36	2783	2737	-2%	2803	1%	19	2520	2693	7%	2563	2%
35	2920	3091	6%	2938	1%	18	2555	2730	7%	2598	2%
34	2646	2893	9%	2668	1%	17	2589	2766	7%	2634	2%
33	2646	2828	7%	2668	1%	16	2618	2796	7%	2666	2%
32	2649	2830	7%	2695	2%	15	2641	2820	7%	2687	2%
31	2639	2820	7%	2687	2%	14	3022	3144	4%	3062	1%
30	2626	2806	7%	2674	2%	13	2689	2950	10%	2732	2%
29	2609	2788	7%	2657	2%	12	2705	2888	7%	2754	2%
28	2587	2765	7%	2634	2%	11	2721	2904	7%	2767	2%
27	2561	2738	7%	2607	2%	10	2735	2919	7%	2782	2%
26	2354	2518	7%	2392	2%	9	2749	2934	7%	2796	2%
25	2861	2977	4%	2903	1%	8	2762	2947	7%	2808	2%
24	2464	2715	10%	2508	2%	7	2774	2960	7%	2821	2%
23	2445	2617	7%	2471	1%	6	2824	3007	6%	2871	2%
22	2452	2623	7%	2498	2%	5	2927	3098	6%	2973	2%
21	2460	2631	7%	2507	2%	4	4692	4740	1%	4711	0%
20	2487	2659	7%	2533	2%						

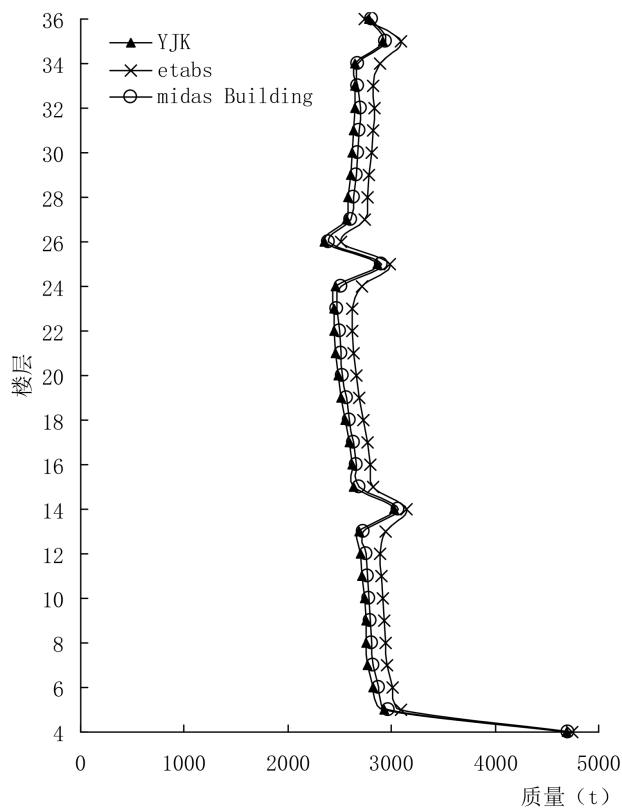


Figure 2. Distribution diagram of storey mass
图 2. 楼层质量分布图

3.2. 周期和振型

前 10 阶振型的周期对比见表 2, 表中列出了各阶振型的周期、振型方向因子(平动系数 X + Y/扭转系数 Z)及周期比。从表中可以看出, 三种软件计算的各阶振型的周期结果均比较接近, 偏差基本在 3% 以内, 第 1、2 阶振型均以平动为主, 第 3 阶均以扭转为主, 周期比均小于规范限值。发现, YJK 第 1 阶为 Y 向平动、第 2 阶为 X 向平动, 而 Etabs、midas Building 第 1 阶为 X 向平动、第 2 阶为 Y 向平动, 这是因为不同软件在特征值分析统计时有差别, 如 YJK 中特征值分析是 DX、DY、RZ 三个自由度, Etabs、midas Building 中是 DX、DY、DZ、RX、RY、RZ 六个自由度, 从而导致平动振型方向相反, 此现象在其它结构体系中亦有体现[5]。需要注意的是, 本工程由于存在斜柱, Etabs 中斜柱的对象类型为支撑, 程序在自动计算端部偏移时, 支撑构件的端部偏移长度默认为 0, 同时以上梁柱端部偏移长度的计算方法均不会考虑支撑的截面尺寸, 因此会影响斜柱的梁柱节点处重叠部分的刚域计算, 从而影响结构的自振周期。

Table 2. The period comparison of the first 10 modes

表 2. 前 10 阶振型周期对比

振型	YJK	Etabs	$\Delta 1$	midas	$\Delta 2$
1	3.159 (0.04 + 0.96/0.0)	3.191 (0.95 + 0.05/0.0)	1%	3.169 (0.88 + 0.08/0.0)	0%
2	3.127 (0.96 + 0.04/0.0)	3.187 (0.05 + 0.95/0.0)	2%	3.145 (0.08 + 0.89/0.0)	1%
3	2.008 (0.00 + 0.00/1.0)	1.993 (0.00 + 0.00/1.0)	-1%	2.054 (0.00 + 0.00/1.0)	2%
4	0.934 (0.00 + 1.00/0.0)	0.937 (0.00 + 1.00/0.0)	0%	0.927 (0.00 + 1.00/0.0)	-1%
5	0.811 (0.99 + 0.00/0.0)	0.815 (0.95 + 0.00/0.1)	0%	0.829 (0.99 + 0.00/0.0)	2%
6	0.692 (0.01 + 0.00/1.0)	0.685 (0.05 + 0.00/0.9)	-1%	0.710 (0.01 + 0.00/1.0)	3%
7	0.458 (0.00 + 0.99/0.0)	0.459 (0.00 + 1.00/0.0)	0%	0.455 (0.00 + 0.99/0.0)	-1%
8	0.404 (0.31 + 0.00/0.7)	0.412 (0.31 + 0.00/0.7)	2%	0.417 (0.41 + 0.00/0.6)	3%
9	0.388 (0.69 + 0.01/0.3)	0.372 (0.69 + 0.00/0.3)	-4%	0.398 (0.72 + 0.01/0.3)	3%
10	0.303 (0.00 + 0.98/0.0)	0.304 (0.00 + 0.99/0.0)	0%	0.302 (0.00 + 0.96/0.0)	0%
周期比	0.636	0.625	-2%	0.648	2%

3.3. 楼层剪力

在计算地震作用下的楼层剪力时, Etabs 只给出根据规范要求最小剪重比的建议调整系数, 不给出调整后的楼层剪力, 因此为便于比较, 各模型在地震下的楼层剪力均取调整前的结果。另外, Etabs 计算风荷载时, 风压高度变化系数按上下层各一半层高范围内进行计算, 计算得到的风荷载再集中到该楼层, 按此计算的楼层剪力与 YJK 计算结果偏差较大, 尤其是顶部几层, 对本工程的计算结果比较发现, 顶部三层偏差可达 15%~50%, 因此为避免计算方法带来的偏差, Etabs 风荷载下的楼层剪力可作如下近似转换:

$$F_i = \frac{F_i}{\frac{H_i}{2} + \frac{H_{i+1}}{2}} \times \frac{H_i}{2} + \frac{F_{i-1}}{\frac{H_i}{2} + \frac{H_{i-1}}{2}} \times \frac{H_i}{2}$$

式中, F_i 、 F_{i-1} 为本层、下层的楼层剪力, H_i 、 H_{i+1} 、 H_{i-1} 为本层、上层、下层的层高。

按上述统计方法, 在多遇地震和风荷载作用下的楼层剪力对比见图 3、图 4, 从图中可以看出, 三种软件计算得到的楼层剪力比较接近, Etabs 偏差基本在 6% 以内, midas Building 地震工况偏差基本在 3% 以内, 风荷载工况基本无偏差。

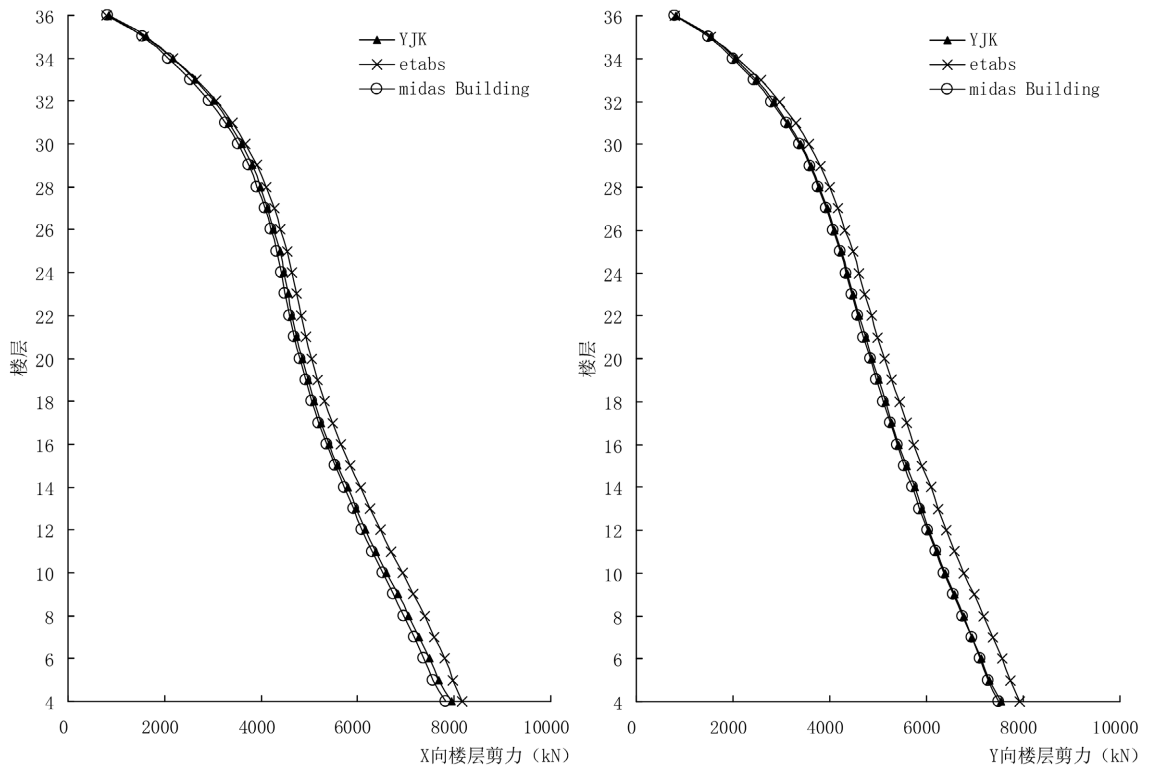


Figure 3. Distribution diagram of storey shear force under frequent earthquake

图 3. 多遇地震作用下楼层剪力分布图

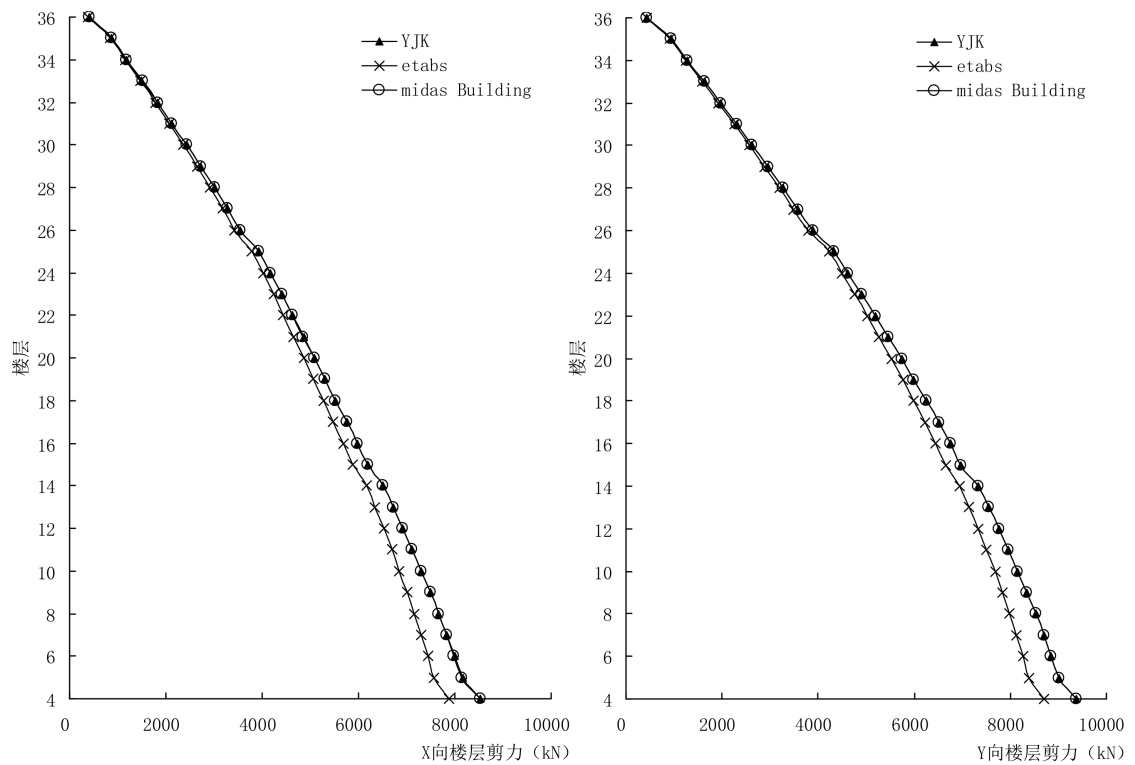


Figure 4. Distribution diagram of storey shear force under wind load

图 4. 风荷载作用下楼层剪力分布图

3.4. 倾覆力矩

由于 Etabs 未直接给出规定水平力下各层的倾覆力矩, 为便于同 YJK 比较, 两者均取多遇地震下的倾覆力矩, 对比见图 5, 在规定水平力下 midas Building 与 YJK 的各层倾覆力矩对比见图 6, 风荷载下三者各层倾覆力矩对比见图 7, 其中 Etabs 楼层倾覆力矩按楼层剪力相似方法进行近似转换。从图中可以看出, 三种软件计算得到的楼层倾覆力矩比较接近, Etabs 偏差基本在 5% 以内, 地震工况下顶层偏差略大一些, midas Building 规定水平力下偏差基本在 5% 以内, 风荷载工况基本无偏差。

规定水平力及风荷载下结构底部倾覆力矩对比见表 3。需要注意的是, Etabs 计算规定水平力下底层倾覆力矩时, 给出的是模型中 1 层即实际建筑地下三层底部的倾覆力矩, 另外, 核心筒端柱的倾覆力矩统计到框架中, 而斜柱的倾覆力矩未统计到框架中, 因此须通过定义截面切割组, 对计算结果进行处理, 表 3 中的 Etabs 数值即为处理后的结果。从表中可看出, 规定水平力及风荷载下, 三种软件计算得到的底部倾覆力矩均较接近, 偏差基本在 5% 以内, 规定水平力下框架承担的倾覆力矩百分比偏差略大, 但在可接受偏差范围内, 各软件计算的框架承担倾覆力矩百分比均大于 10%、小于 50%。

Table 3. Comparison of bottom overturning moment

表 3. 底层倾覆力矩对比

类别	方向	YJK	Etabs	$\Delta 1$	midas Building	$\Delta 2$
规定水平力作用下 底层地震倾覆力矩(kN·m)	X	796,231	798,623.1	0.3%	758,627	-4.7%
	Y	773,148	788,307.2	2.0%	742,755	-3.9%
规定水平力作用下底层框架 承担倾覆力矩百分比(%)	X	24.2	22.1	-8.7%	21.1	-12.8%
	Y	27.0	25.5	-5.8%	27.1	0.2%
风荷载作用下 底层倾覆力矩(kN·m)	X	766,820	725,348.9	-5.4%	766,434	-0.1%
	Y	852,655	810,461.7	-4.9%	852,655	0.0%

3.5. 侧向刚度

楼层侧向刚度对比见图 8, 图中侧向刚度均按多遇地震下“楼层剪力/层间位移”计算, 可见三种软件计算得到的楼层侧向刚度均较接近, 偏差基本在 4% 以内。从图中还可看出, 在 4、14、25 层(即实际建筑首层、十一层、二十二层)出现刚度突变, 均是因为层高变化引起, 首层层高 11.6 m, 为二层层高 4.7 m 的 2.47 倍, 十一层、二十二层为避难层, 层高 6.3 m, 均为相邻上层层高 4.2 m 的 1.5 倍。本工程为框架-核心筒结构, 按“高规”考虑层高修正后, 相邻楼层侧向刚度变化满足规范要求, 不属软弱层。

3.6. 位移比、位移角

最大层间位移角、位移比及所在楼层见表 4, 多遇地震下的层间位移角见图 9。由图表及计算结果可知, 三种软件计算得到的位移角、位移比均较接近, 且分布规律相同。Etabs 计算的位移角在地震下的偏差略大一些, 风荷载下偏差较小, 基本在 5% 以内, 计算的位移比偏差则基本在 4% 以内; midas Building 计算结果更为接近 YJK, 偏差基本在 3% 以内, 局部楼层在考虑偶然偏心的 X 向规定水平力下位移比偏差在 8% 以内。

4. 结语

本文结合实际复杂工程, 采用 YJK、Etabs、midas Building 三种分析软件分别进行多遇地震下的振型分解反应谱分析, 可以得出以下几点结论。

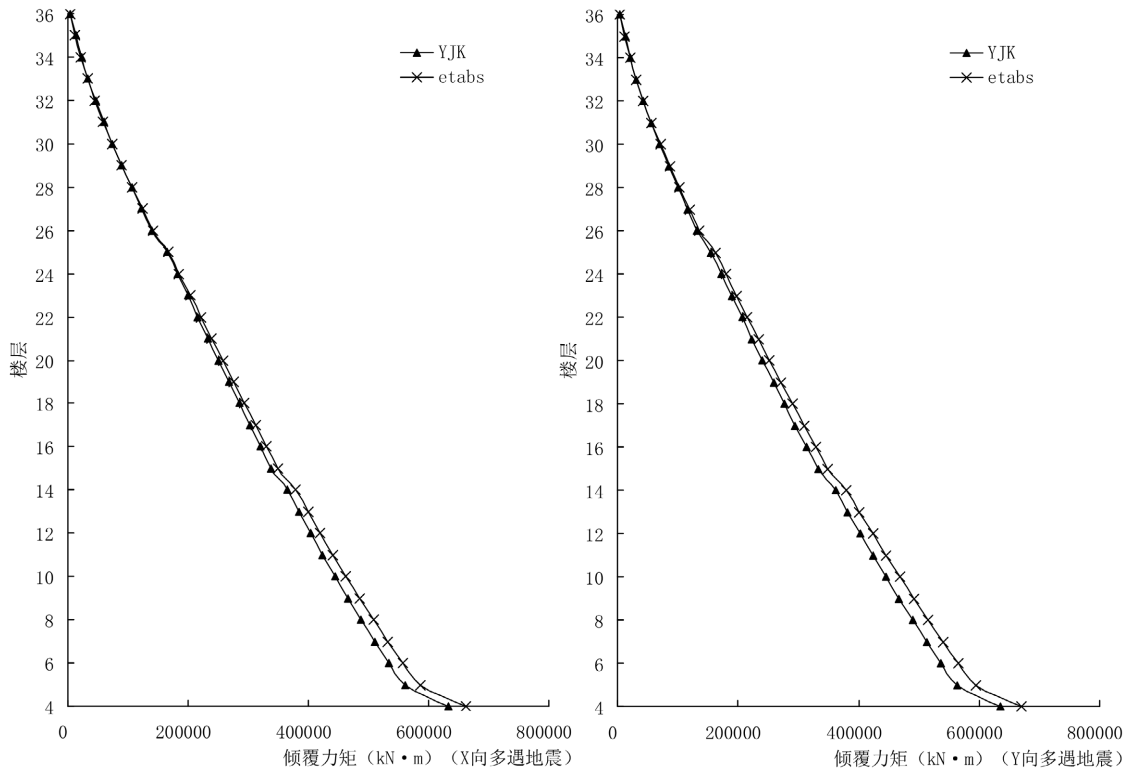


Figure 5. Distribution diagram of overturning moment between YJK and Etabs under frequent earthquake
图 5. 多遇地震下 YJK 与 Etabs 楼层倾覆力矩分布图

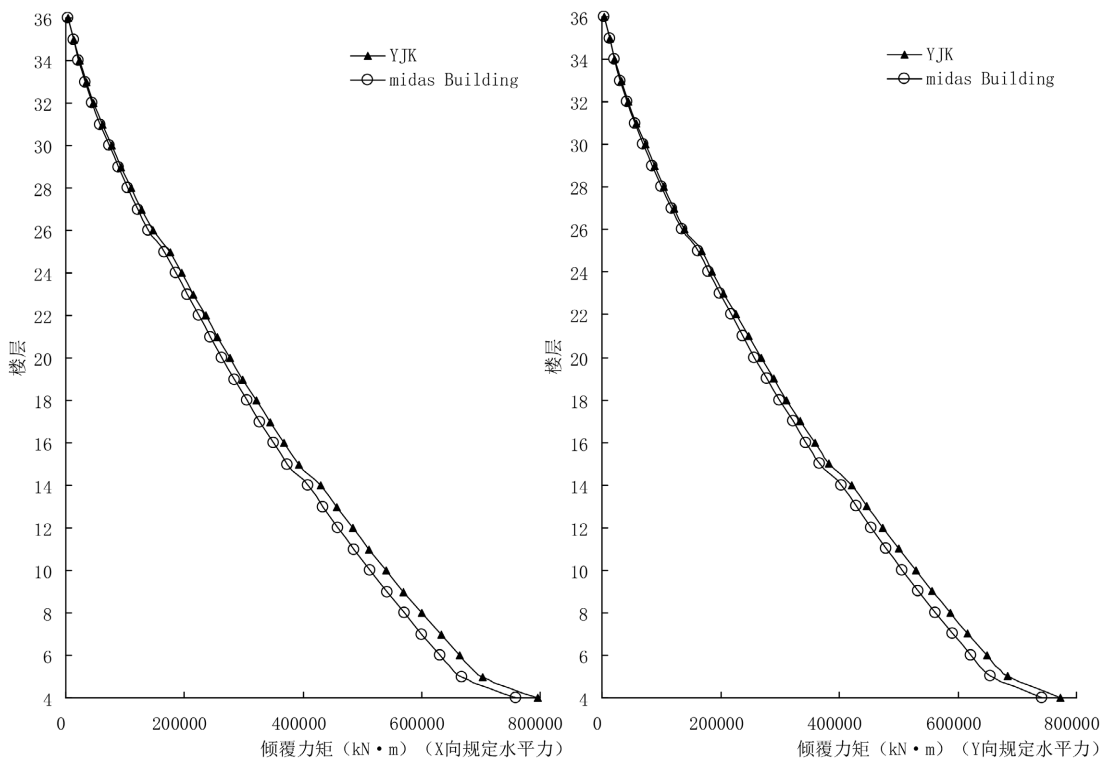


Figure 6. Distribution diagram of overturning moment between YJK and midas Building under specified horizontal force
图 6. 规定水平力下 YJK 与 midas Building 楼层倾覆力矩分布图

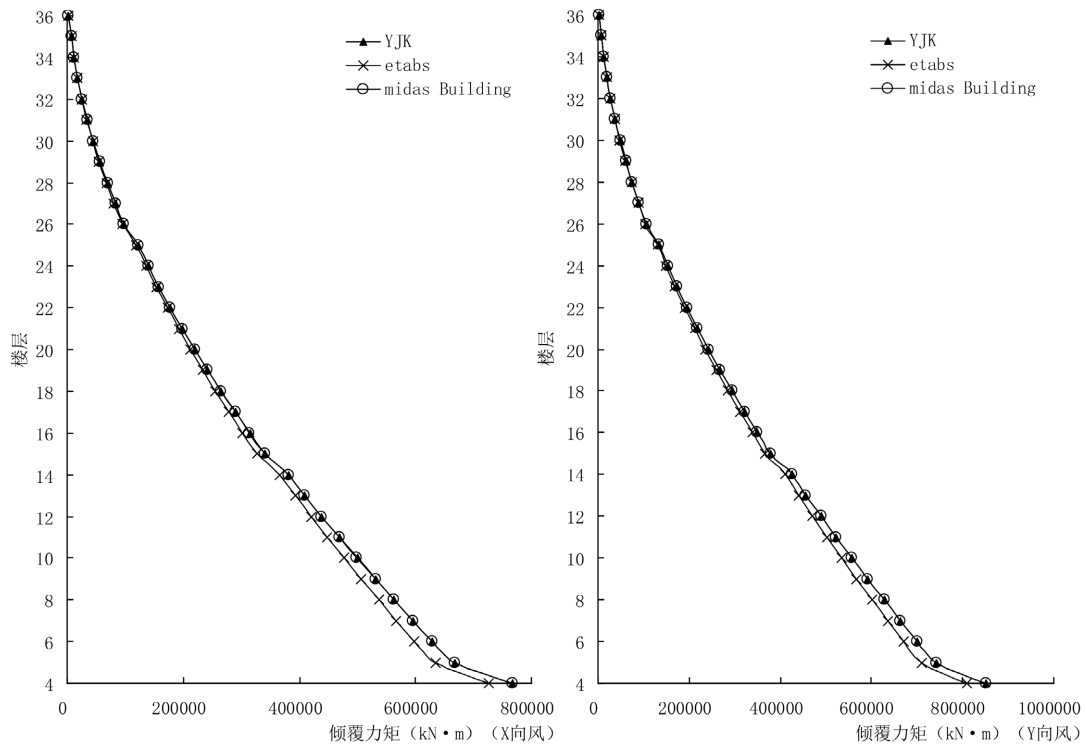


Figure 7. Distribution diagram of overturning moment under wind load

图 7. 风荷载下楼层倾覆力矩分布图

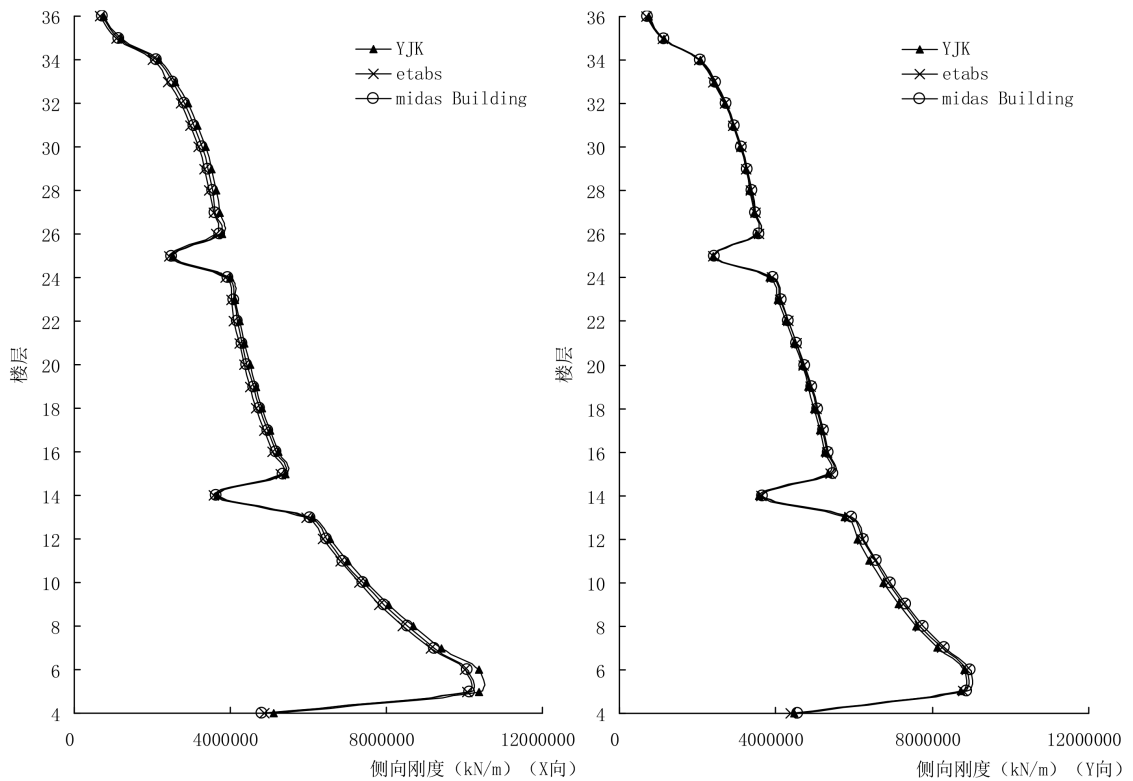


Figure 8. Distribution diagram of inter-storey lateral stiffness

图 8. 楼层侧向刚度分布图

Table 4. Comparison of maximum displacement ratio and displacement angle
表 4. 最大位移比、位移角对比

类别	方向	YJK	Etabs	$\Delta 1$	midas Building	$\Delta 2$
地震作用下最大层间位移角(层号)	X	1/3537 (25 层)	1/3122 (25 层)	13%	1/3577 (25 层)	-1%
	Y	1/3497 (25 层)	1/3311 (25 层)	6%	1/3569 (25 层)	-2%
风荷载作用下最大层间位移角(层号)	X	1/3395 (25 层)	1/3514 (25 层)	-3%	1/3349 (25 层)	1%
	Y	1/3140 (25 层)	1/3311 (14 层)	-5%	1/3028 (14 层)	4%
考虑偶然偏心的规定水平力作用下最大位移比(层号)	X	1.17 (4 层)	1.182 (4 层)	1%	1.082 (4 层)	-8%
	Y	1.12 (4 层)	1.092 (4 层)	-3%	1.139 (4 层)	2%

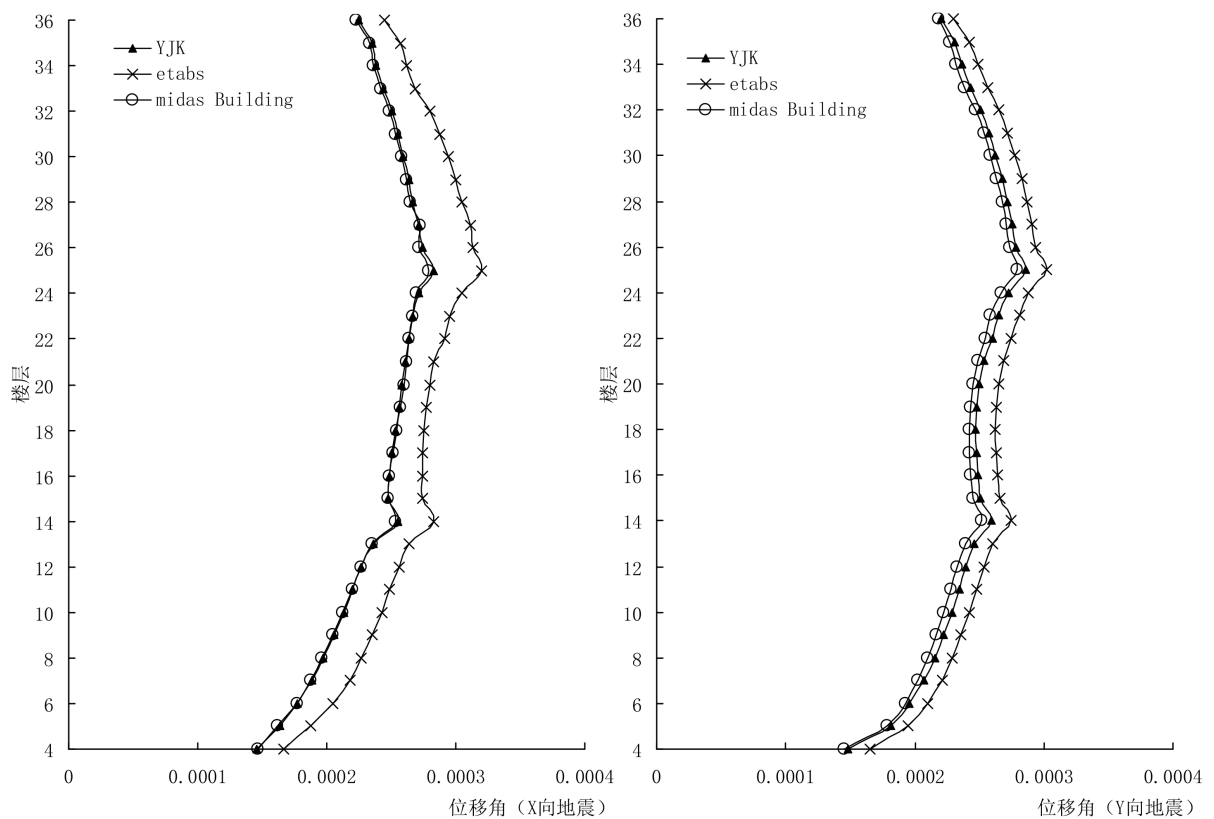


Figure 9. Distribution diagram of displacement angle under frequent earthquake
图 9. 多遇地震下位移角分布图

1) 三种软件计算得到的楼层质量、周期、楼层剪力、倾覆力矩、楼层刚度、扭转位移比、位移角等性能指标结果均比较相近,当复杂结构需采用不少于两个不同力学模型计算分析时,Etabs、midas Building 均可作为 YJK 的辅助分析软件;

2) 因特征值分析时自由度的选取不同,Etabs、midas Building 计算得到的前 2 阶振型方向可能会出现与 YJK 相反的现象;

3) Etabs 在计算楼层质量及风荷载时,按上下层各一半层高范围进行计算,再集中到该楼层,在分析含有斜柱或剪力墙端柱的结构时,端柱的倾覆力矩统计到框架中,而斜柱的倾覆力矩未统计到框架中,因此须通过定义截面切割组,对计算结果进行人工处理;

4) midas Building 与 YJK 的使用场景比较一致, 某些指标的计算结果相较 Etabs 更为接近 YJK。

需要说明的是, 以上分析比较仅针对文中具体实际复杂工程, 对其它复杂结构, 如大底盘多塔结构、错层结构、连体结构等, 尚需做进一步对比分析。

参考文献

- [1] 黄世敏, 王亚勇, 等. GB 50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 徐培福, 黄小坤, 容柏生, 等. JGJ 3-2010. 高层建筑混凝土结构设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] 钟远志. Midas Gen 和 ETABS 有限元软件在建筑结构整体分析中的应用[J]. 福建建材, 2018(8): 7-8+64.
- [4] 杨毅萌, 胡凯, 慕遂峰, 等. ETABS、SAP2000、MIDAS/Gen、SATWE 等程序在带斜柱复杂高层计算分析中的应用和比较[C]//CUC 金土木结构软件全国用户大会. CUC 金土木结构软件全国用户大会论文集. 北京: 北京金土木软件技术有限公司, 2010.
- [5] 刘军. 高烈度区高层剪力墙结构采用不同程序计算比较[J]. 城市建筑, 2016(2): 59-60.