

沈毅,郭阳照.建筑结构中抗震分析模型的优化研究[J].地震工程学报,2018,40(3):490-496.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.490

SHEN Yi, GUO Yangzhao. Optimization Research on a Seismic Analysis Model of Building Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 490-496. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.490

建筑结构中抗震分析模型的优化研究

沈毅¹, 郭阳照²

(1. 浙江建设职业技术学院, 浙江 杭州 311231; 2. 四川省建筑科学研究院, 四川 成都 610081)

摘要: 大多数建筑结构由梁、柱、支撑、剪力墙、地基和楼板等主要结构组成。一般而言,楼板对建筑结构的抗震性能可以忽略不计,所以进行建筑结构分析的模型是无楼板的。因此,楼板被刚性隔板代替,以提高分析效率。本文提出的建筑结构抗震分析解析模型考虑了楼板抗弯刚度,该模型采用超级单元、刚性隔板和子结构技术来减少自由度。通过实例分析,验证了该模型在多层建筑结构抗震分析中的有效性和准确性。且此模型能够显著减少计算量,提高分析效率,振动周期和响应时间等分析结果的精度与精化模型的结果非常接近,说明该模型的提出是合理的。

关键词: 楼板; T梁效应; 超级单元; 刚性隔板; 棒模型

中图分类号: TU352; TU318

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)03-0490-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.490

Optimization Research on a Seismic Analysis Model of Building Structures

SHEN Yi¹, GUO Yangzhao²

(1. Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, Zhejiang, China;

2. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: Most building structures consist of main structures such as beams, columns, braces, shear walls, foundation, and floors. Generally, the seismic performance of the floor slab to the building structure is negligible; therefore, analysis models of building structures do not consider floors, and the floor slab is replaced by a rigid baffle to increase the analysis efficiency. The seismic analysis model of building structures proposed in this paper considers the bending stiffness of the floor. The model uses super element, rigid baffle, and substructure technique to reduce the degree of freedom. Through an example analysis, the validity and accuracy of the model in the seismic analysis of multi-story building structure are verified. The proposed model can significantly reduce computational complexity and improve analysis efficiency. Moreover, the accuracy of the analysis results, such as the vibration cycle and response time, is very close to the result of the refined model, which substantiates the efficiency of the proposed model.

Key words: floor slab; T-shape beam effect; super element; rigid baffle; stick model

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 住房和城乡建设部科技基金计划项目“川西高海拔地区房屋工程建设关键技术研究”(2016-K6-006); 四川省科技支撑计划项目“自减震装配式房屋关键技术研究”(2016FZ0014)

作者简介: 沈毅(1968—), 女, 上海人, 硕士, 讲师, 研究方向: 建筑结构、地基基础。E-mail: shenyi0066@163.com。

0 引言

近年来,世界各国地震灾害频发,人们越来越关注建筑结构的抗震性能,重视建筑工程的安全问题^[1]。所以本文对建筑结构中抗震分析模型进行了进一步的优化研究。刚性隔膜假设经常被应用于建筑结构的分析过程中,在这种情况下,楼板的弯曲刚度通常被忽略。此外,建筑结构中梁位于楼板下方,假设梁和楼板的轴线位于同一平面内,建立分析模型。在动态分析中,不考虑楼板抗弯刚度和 T 梁效应会产生实质性的误差。何政^[2]等将地震对不同截面损伤模型导致结构失效的影响进行了统计分析,结果表明:截面损伤模型对结构失效模式的影响有限,不同截面损伤模型得到的失效模式大体相近。Gupta 和 Ma^[3]对考虑 T 形梁效应所引起的分析误差进行了研究,并建议将梁单元分成几个元素以最小化误差。在梁单元的两个节点之间,Miller^[4]引入了光束长度方向平移自由度,以减少使用刚性连接元件导致的分析误差。刘坚等^[5]提出了考虑楼板刚度影响的十参数梁柱节点外伸端板半刚性连接智能模型。研究结果表明:楼板的存在增大了梁柱节点刚度,减少了节点相对转动,在实际工程中会产生很大的误差。

本文在考虑楼板的抗弯刚度^[6]和 T 梁效应的前提下提出了高效建模技术。研究了梁和楼板单元网格尺寸的最小数目以便于建立模型。对网格尺寸进行了大量研究后,为了减少计算分析时间,提出了应用子结构技术构建的分析模型^[7-8]和基于刚性隔膜假设的每层 3 自由度构建的棒模型。对固有频率、模态形状和示例建筑结构的动态响应的计算时间进行比较,来判断本文提出的建模技术的有效性和合理性。

1 地板和梁的分析建模

1.1 计算模型

多自由度体系在地面运动 $\ddot{u}_g(t)$ 激励下的动力响应控制方程为^[9]:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -ml\ddot{u}_g(t) \tag{1}$$

式中: u 为位移响应向量; m 、 k 和 c 分别为质量、阻尼和刚度矩阵; l 为影响向量。

对于建筑结构的非线性地震响应分析,振型分析已经不再适合,所以采用时程分析,根据达朗贝原理建立平衡方程,结构的非线性地震运动方程可表示为^[10]:

$$M\{\ddot{u}(t)\} + C\{\dot{u}(t)\} + F_S\{u(t)\} = -M\{I\}\ddot{u}_g(t) \tag{2}$$

式中: M 为结构的集中质量矩阵; C 为结构的黏滞阻尼矩阵; $\{\ddot{u}(t)\}$ 、 $\{\dot{u}(t)\}$ 、 $\{u(t)\}$ 为结构的加速度、速度、位移向量; $\{I\}$ 为等效地震载荷的空间分布; $\ddot{u}_g(t)$ 为水平地震加速度; $F_S\{u(t)\}$ 为结构的恢复力,非线性结构体系的恢复力与结构变形之间为非线性关系。

采用 Newmark- β 积分方法求解,在非线性体系中,建筑结构的刚度矩阵是反应量的函数,因此运动方程改写为增量的形式,表达式为:

$$M\{\Delta\ddot{u}\} + g\{\Delta\dot{u}\} + K\{\Delta u\} = -M\{\Delta\ddot{u}_g\} \tag{3}$$

1.2 采用刚性隔膜假设与矩阵构建模型

在建筑结构中,楼板的弯曲刚度与楼板的平面内刚度相比可以忽略不计。当刚性隔膜假设应用于楼板时,采用“侧刚计算法”,即每个楼层所有节点处的位移由两个水平方向平移自由度和一个垂直轴自由度的旋转自由度表示。图 1 显示出了应用刚性隔膜假设和矩阵技术减少的自由度。

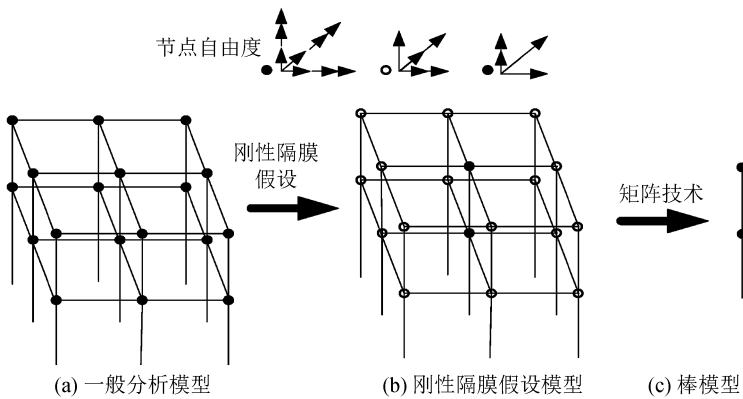


图 1 通过刚性隔膜假设和矩阵减少的自由度

Fig.1 Reduction of DOF by rigid diaphragm assumption and matrix

如图 1(a)所示的一般分析模型采用刚性隔膜假设时图 1(b)所示结构每个层面的两个平面内有平移自由度和一个旋转自由度。此外,当矩阵凝结技术^[11]应用于平面外的自由度时,能够建立每层具有 3 个自由度的棒模型,如图 1(c)所示。一般的分析模型、刚性隔膜假设模型和棒模型的每层自由度数分别为 54、30 和 3。因此,通过刚性隔膜假设和基体凝结技术建模可以提高大型建筑结构的计算分析效率。

1.3 建模方法造成的结构响应

为了研究采用三种不同方法组建的建筑结构模型对梁和楼板的抗震性能的影响,选择图 2 所示的示例结构并对其进行特征值分析。对于模型 A 和模型 C,使用张赤超的平面应力单元^[12]和史文海

的矩形单元^[13]对楼板进行建模。Petyt 元素^[14]适用于模型 A 中的 T 型梁。示例结构的柱子大小分别为 60 cm×60 cm 和 45 cm×45 cm,为 1~2 层和 3~4 层。其中梁的尺寸均为 60 cm×40 cm,楼板的厚度均为 20 cm。模型 A 考虑了楼板的弯曲刚度和 T 梁效应。模型 C 只考虑了楼板的弯曲刚度,假设梁和楼板的轴线位于一个平面内。为了提高分析效率,地板也被刚性地板隔膜替代。在上述三种分析模型中,模型 A 得到的分析结果最准确。

表 1 显示了三种分析模型的固有频率。模型 B 和模型 C 的频率相对低于模型 A 的频率。原因是模型 B 没有考虑楼板的弯曲刚度和 T 梁效应,模型 C 没有考虑 T 梁效应。所以模型 B 和模型 C 的横向刚度相对较低。此外,比较每个分析模型的固有频率,可以观察到,相对于地板的弯曲刚度来说,T 梁效应对结构的动态行为影响更大。

表 1 固有频率比较(单位:Hz)

Table 1 Comparison between natural frequencies (Unit: Hz)			
序号	模型 A	模型 B	模型 C
1	1.920	1.404	1.507
2	1.952	1.461	1.552
3	2.290	1.794	1.866
4	4.979	4.035	4.229
5	5.025	4.142	4.313

在地震分析中,结构的固有频率影响结构响应。对于地震的准确性,分析模型的 T 梁效应可以使误差降低。但是,从表 2 可以看出,由于细化单元网格,模型 A 和模型 C 所需的计算分析时间比模型 B 的计算分析时间要长。这些用于大型结构的细化单元网格需要更长的计算时间和更大的计算机内存容量。为了计算时间减少和计算机内存容量降低不对分析结果造成影响,需要一种更有效的分析模型。

表 2 计算时间比较(单位:s)

Table 2 Comparison between calculation time (Unit: s)			
	模型 A (3,510 自由度)	模型 B (15 自由度)	模型 C (3,510 自由度)
刚度和质量	62.22	1.63	61.41
特征值	20 038.69	0.02	20 037.48
历史时间	77.09	0.12	77.24
总计	20 178.00	1.77	20 176.13

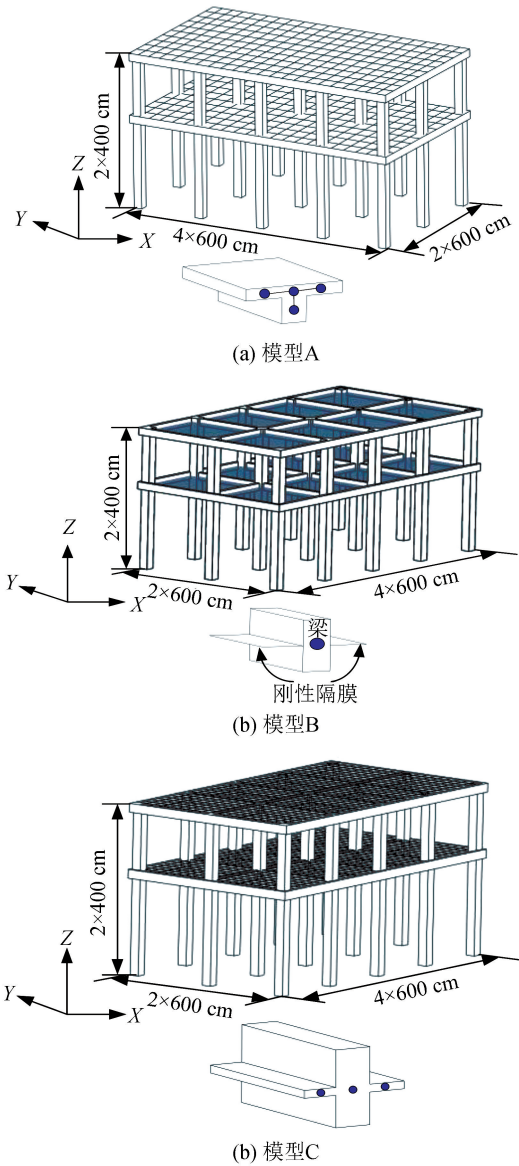


图 2 梁板模型
Fig.2 Models of beam and floor slab

2 地震分析模型

2.1 采用子结构技术和超级单元进行结构建模

用于建筑物结构分析的模型 A 具有精确的有限元网格,有较多的自由度,在实际工程中可以应用。因此,提出的高效抗震分析模型考虑了楼板的抗弯刚度,如图 3 所示的模型采用超级单元,利用刚性隔膜和底层结构技术使分析中使用的自由度数最小。

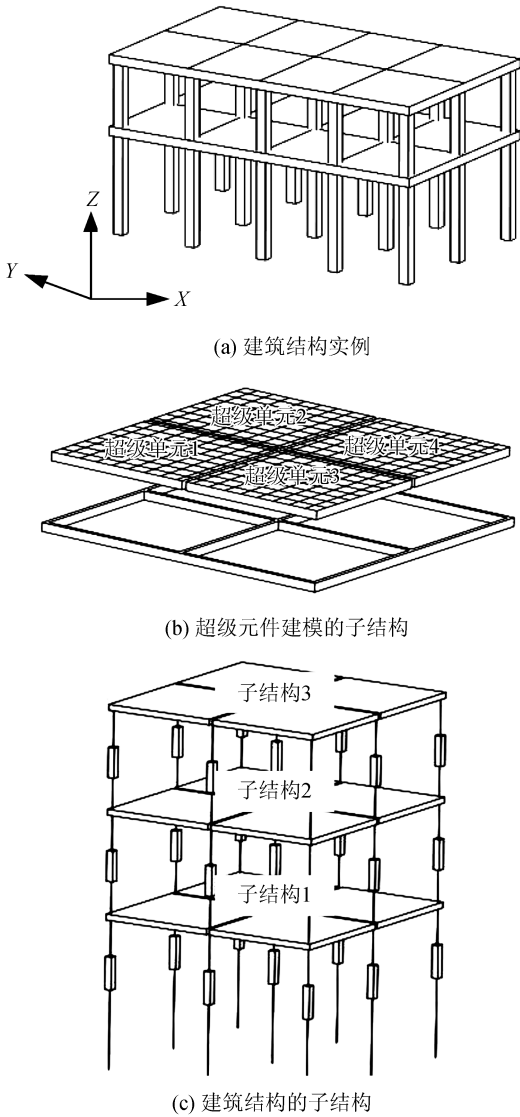


图 3 梁和楼板的模型
Fig.3 Models of beam and floor slab

如图 3(a)所示的示例结构可以分为如图 3(c)所示的每个楼层的柱子、子结构 1、子结构 2 和子结构 3^[15]。如图 3(b)所示,被梁包围的楼板也可以分成几个超级单元。超级单元是指楼板在数值分析时处于相同条件下的大量网格作为 1 个超级单元。为

了满足超级单元边界的相容条件,每节点有 6 个自由度作为主自由度,其余节点作为从自由度。图 4(a)表示主自由度和从自由度。当矩阵技术应用于主节点时,可以建立凝聚刚度和质量矩阵。图 4(b)显示了由相同超级单元组成的子结构。对于相容性条件,子结构和柱子满足的节点被选为主自由度。

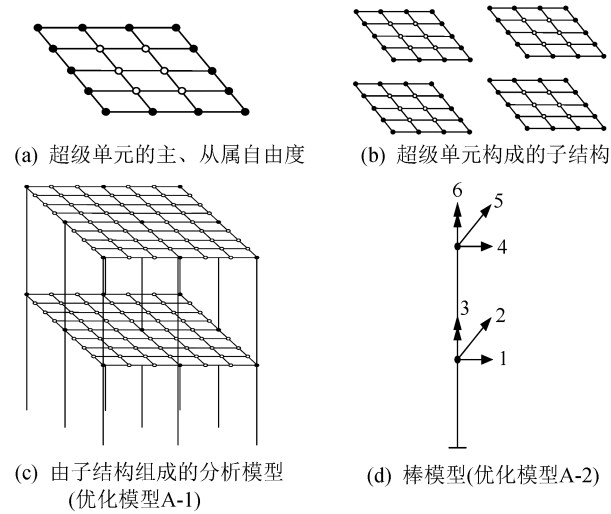
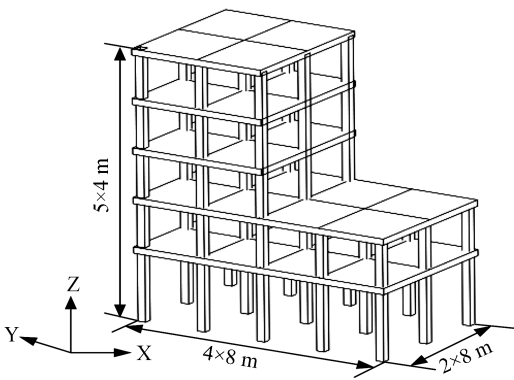


图 4 每个结构自由度的选择
Fig.4 Selection of DOF for each structure

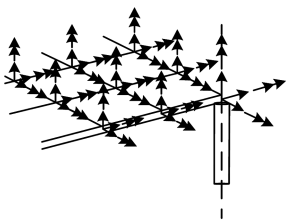
将矩阵技术应用于剩余节点,得到凝聚刚度和质量矩阵。图 4(c)显示了由子结构组成的分析模型。每个结构由子结构和柱子组成。因此,每一个子结构都可以独立发展,柱子的刚度矩阵需要叠加到子结构上,从而形成整个建筑结构矩阵。开发的分析模型被称为优化模型 A-1,是由模型图 2(a)的子结构技术和超级单元组成。利用超级单元和子结构技术,逐步减少自由度的数目,从而有效地减少矩阵的压缩时间。子结构技术可以有效地应用在建筑结构上,如果每个建筑结构含有很多柱子,则自由度的数目也将增加。在这项研究中,刚性隔膜假设适用于图 4(c)的主自由度。所以,分析模型被改变为棒模型,如图 4(d)所示。棒模型考虑了楼板和梁的抗弯刚度影响,得到相对准确的结构性能,图 1(c)中所示的假设只适用于刚性隔膜的棒模型。提出的分析模型被称为优化模型 A-2,由优化模型 A-1 采用刚性楼板假设生成。

2.2 分析模型的动态特性比较

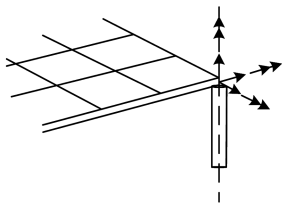
为了检验子结构和超级单元自由度的分析效率和准确性,利用 El19405 分量地震仪对示例结构(A)进行地震分析。所有分析模型都考虑了楼板的弯曲刚度和T形梁效应。如图5(a)所示,被梁包围的



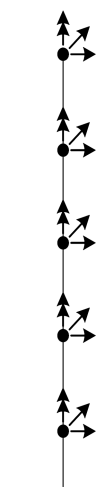
(a) 建筑物结构



(b) 模型A



(c) 优化模型A-1



(d) 优化模型A-2

图 5 分析模型

Fig.5 Analysis model

楼板分成 4×4 个单元,每个单元的剖面尺寸总结在表 3 中。对于模型 A,考虑到了所有的自由度。对于优化模型 A-1,选择 6 个自由度作为楼板和柱子相交的节点的主自由度。优化模型 A-2 是从优化模型 A-1 转换的棒模型,如图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)所示。

表 3 结构构件尺寸(单位:cm)

Table 3 Size of structure members (Unit:cm)			
序号	楼板($B \times H$)	梁($B \times H$)	板的厚度
1~2	75×75	40×60	20
3~5	60×60	40×60	20
6~8	45×45	40×60	20

在配有 Pentium III 550 MHz CPU 和 256 MB RAM 的个人计算机上进行分析。表 4 显示了每个分析模型的自由度总数和分析所需的计算时间。

基于表 4 的分析研究,观察到进行特征值分析所消耗的计算时间最多。还发现,当应用于结构技术、超级单元和刚性隔膜假设时,计算时间大幅度减少,组织刚度矩阵和结构质量矩阵所需的时间也会减少。每个分析模型的固有频率如表 5 所列。在这个表中,假设模型 A 的频率为准确频率。

由表 5 可知:对于仅考虑框架并且楼板被刚性地板隔膜替换的模型 B,相对固有频率较低并且误差严重。但是,优化模型 A-1 的固有频率误差很小。优化模型 A-2 的固有频率的误差比优化模型 A-1 稍大,但与模型 B 产生的误差相比仍较小。所以

表 4 计算时间比较(单位:s)

Table 4 Comparison between computation time (Unit:s)				
	模型 A (6,588 自由度)	优化模型 A-1 (648 自由度)	优化模型 A-2 (24 自由度)	模型 B (24 自由度)
刚度和质量	102.24	7.62	8.46	0.87
特征值	25 740.15	77.22	0.02	0.02
历史时间	140.43	18.62	1.83	1.81
总计	25 982.82	103.46	10.31	2.70

表 5 固有频率比较(单位:Hz)

Table 5 Comparison between natural frequencies (Unit:Hz)							
模型序号	模型 A	优化模型 A-1		优化模型 A-2		模型 B	
	频率	频率	误差/%	频率	误差/%	频率	误差/%
1	1.400	1.400	0.00	1.426	1.86	1.008	-28.00
2	1.596	1.596	0.00	1.630	2.13	1.182	-25.94
3	2.260	2.261	0.04	2.356	4.24	1.758	-22.21
4	3.171	3.172	0.03	3.224	1.67	2.347	-25.99
5	3.296	3.297	0.03	3.357	1.85	2.490	-24.45
6	3.589	3.590	0.03	3.686	2.70	2.810	-21.71
7	6.107	6.114	0.11	6.241	2.19	4.902	-19.73
8	6.186	6.194	0.13	6.296	1.78	4.850	-21.60
9	7.356	7.366	0.13	7.716	4.89	6.280	-14.63
10	8.204	8.223	0.23	8.316	1.37	6.670	-18.70

刚性隔膜假设和对称结构可以减少误差。图 6 显示了顶层结构的 y 方向加速度和位移时间曲线。

与模型 A 相比,优化模型 A-1 和优化模型 A-2 的响应非常相似,因为模型 A、优化模型 A-1 和优

化模型 A-2 的低频模式形状相似,而模型 B 的响应与预期的不一样。因此,优化模型 A-1 能够进行相对精确的地震分析。在分析时间和计算机存储容量方面,优化模型 A-2 是一种有效的地震分析模型。

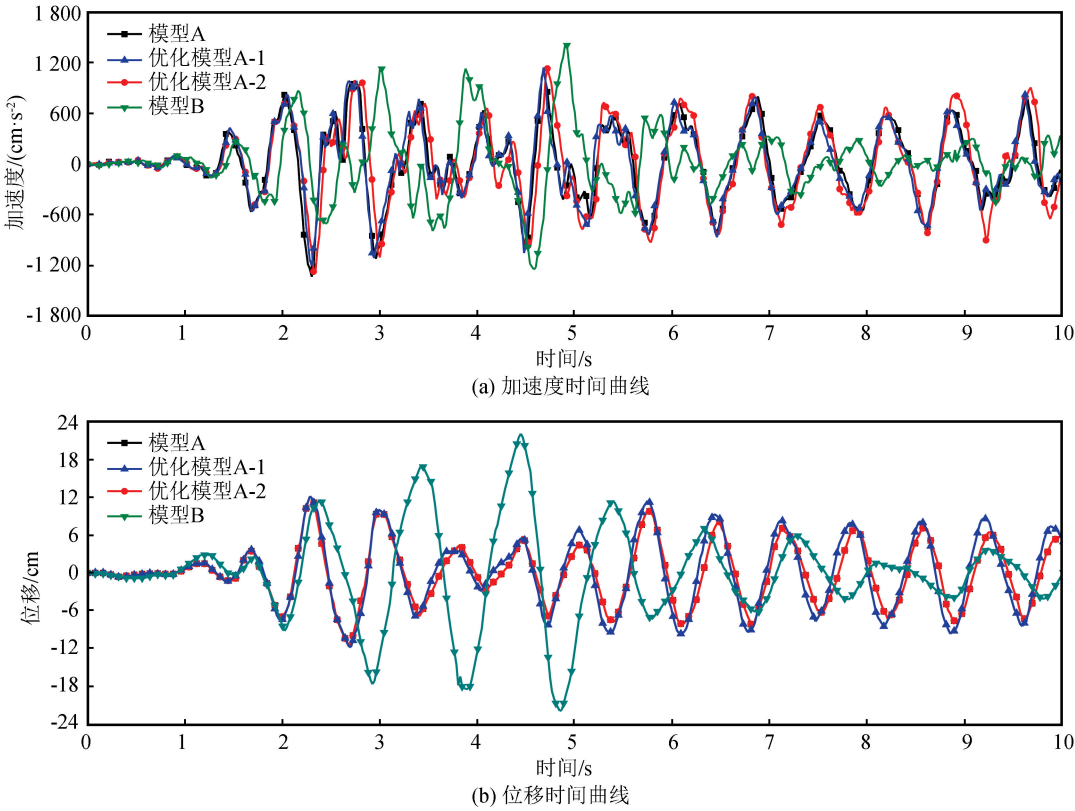


图 6 顶层时间曲线的比较

Fig.6 Acceleration—time and displacement—time curves at the top of the structure

3 结论

本文提出了使用子结构技术和超级单元的高效地震分析模型,模型中包括了楼板和 T 形梁的抗弯刚度影响。通过对实例结构的分析,验证了所提出分析模型的效率和准确性。并在上述基础上研究了其抗弯刚度对结构动态行为的影响。得出如下结论:

- (1) 所提出的优化模型 A-1 能够进行准确的地震分析,提高了分析的效率和准确性。
- (2) 优化模型 A-2 能够有效节省计算时间并减小对计算机存储器容量的要求。
- (3) 为了在分析过程中包含建筑结构的动态特性,构建模型时需要包含楼板和 T 形梁的抗弯刚度。

参考文献(References)

[1] 高晓东.房屋结构抗震设计探讨[J].山西建筑,2016,42(35):

37-38.
GAO Xiaodong.Discussion on Seismic Design of House Structure[J].Shanxi Architecture,2016,42(35):37-38.
[2] 何政,刘耀龙.地震动与损伤模型对结构失效影响的统计分析[J].沈阳工业大学学报,2013,35(5):580-586.
HE Zheng,LIU Yaolong.Statistical Analysis of the Effects of Ground Motion and Damage Models on Structural Failure[J].Journal of Shenyang University of Technology,2013,35(5):580-586.
[3] GUPTA A K,MA P S.Error in Eccentric Beamformulation[J].International Journal for Numerical Methods in Engineering,1977,11(9):1473-1477.
[4] MILLER R E.Reduction of the Error in Eccentric Beammodeling[J].International Journal for Numerical Methods in Engineering,1980,15(4):575-582.
[5] 刘坚,潘澎,李东伦,等.考虑楼板刚度贡献的梁柱节点半刚性连接弯矩-转角神经网络模型[J].建筑科学与工程学报,2016,33(1):99-105.
LIU Jian,PAN Peng,LI Donglun,et al.A Semi-rigid Connection Bending Moment-angle Neural Network Model Consider-

ing the Contribution of Floor Stiffness[J].Journal of Architectural Science and Engineering,2016,33(1):99-105.

[6] 朱旭东,黄信,黄兆纬,等.考虑楼板刚度在复杂结构设计中的研究与应用[J].建筑结构,2016(增刊2):154-157.
ZHU Xudong,HUANG Xin,HUANG Zhaowei,et al.Research and Application of Floor Stiffness in Complex Structure Design [J].Building Structure,2016(Supp2):154-157.

[7] LEE D G,AHN S K,KIM J.An Efficient Modeling Technique for Floor Vibration in Multi-story Buildings[J].Structural Engineering & Mechanics,2000,10(6):603-619.

[8] STEFANO M D,PINTUCCHI B.Seismic Analysis of Eccentric Building Structures by Means of a Refined One Storey Model [C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering,2004:72-82.

[9] 相阳,毋凯冬,罗永峰,等.网架结构竖向抗震性能评估的等效简化模型[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(1):44-51.
XIANG Yang,WU Kaidong,LUO Yongfeng,et al.Equivalent Simplified Model for Evaluating the Vertical Seismic Performance of Grid Structure[J].Journal of Hunan University (Nature Science),2018,45(1):44-51.

[10] 田宇,崔帅文,沈钰皓.钢结构建筑物抗震性能数值仿真与试验研究[J].工程抗震与加固改造,2017,39(4):60-64.
TIAN Yu,CUI Shuaiwen,SHEN Yuhao.Numerical Simulation and Experimental Study on Seismic Performance of Steel Structure Buildings[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2017,39(4):60-64.

[11] GUYAN R J.Reduction of Stiffness and Mass Matrices[J].Aiaa Journal,1965,3(2):380-380.

[12] 张赤超,郑月雷,王春涛.混凝土平面应力单元受压损伤模型[J].工程技术:全文版,2016(9):323.
ZHANG Chichao,ZHENG Yuelei,WANG Chuntao.The Compression Damage Model of Concrete Plane Stress Unit [J].Engineering Technology: Full Text Edition,2016(9):323.

[13] 史文海,李正农,黄斌.12 自由度 4 结点高精度矩形单元[J].工程力学,2010,27(9):22-26.
SHI Wenhai,LI Zhengnong,HUANG Bin.High-precision Rectangular Element with 12-degree-of-freedom 4 Nodes[J].Engineering Mechanics,2010,27(9):22-26.

[14] Maurice Petyt.Introduction to Finite Element Vibration Analysis[M].Cambridge University Press,1990.

[15] 张沛洲,孙宝印,古泉,等.基于数值子结构方法的低延性 RC 框架结构抗震性能精细化分析[J].工程力学,2017,34(b06):38-48.
ZHANG Peizhou,SUN Baoyin,GU Quan,et al.Refinement of Seismic Performance of Low-ductility RC Frame Structures Based on Numerical Substructure Method[J].Engineering Mechanics,2017,34(b06):38-48.