

王娟.高层建筑在连续振动下的壁板结构失稳定 BIM 模型设计[J].地震工程学报,2018,40(3):413-420.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.413

WANG Juan.Panel Structure Instability BIM Model Design of High-rise Buildings under Continuous Vibration[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(3):413-420.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.413

高层建筑在连续振动下的壁板结构 失稳定 BIM 模型设计

王 娟

(郑州工程技术学院,河南 郑州 450044)

摘要: 为了提高高层建筑壁板结构的抗震性,需设计高层建筑在连续振动下的壁板结构失稳定 BIM 模型。应用软件:通过 Revit 塑造高层建筑模型和结构模型,结合 SAP2000 建模性能塑造高层建筑结构的有限元实体模型,实现高层建筑模型的转换,设计 BIM 模型的 IFOD 软件总体结构,实现 BIM 模型的智能化管理。参数:在 BIM 模型的基础上,分析了连续振动下高层建筑壁板结构风致响应,给出高层建筑壁板结构的平均风响应、脉动风响应,得出高层建筑壁板结构位移,实现了高层建筑在连续振动下的壁板结构稳定性分析。实验:实验结果说明,所设计 BIM 模型可对连续振动下的高层建筑加速度时程以及位移时程进行准确分析,且相比传统方法,本文方法对高层建筑在连续振动下的壁板结构是否失稳判断结果比较准确。

关键词: 高层建筑;连续振动;壁板;结构

中图分类号:TB12;TU311.3

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)03-0413-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.413

Panel Structure Instability BIM Model Design of High-rise Buildings under Continuous Vibration

WANG Juan

(Zhengzhou Institute of Technology, Zhengzhou 450044, Henan, China)

Abstract: To improve the seismic behavior of the panel structures of high-rise buildings, a BIM model for the panel structure instability under continuous vibration is designed in this study. The high-rise building model and structure model are established based on the Revit program, and then a finite element model of high-rise building structure is constructed by the SAP2000 software. An overall structure of the IFOD software of BIM model is designed to realize an intelligent management of BIM model. Based on the BIM model, the wind-induced response of panel structure of high-rise buildings under continuous vibration is analyzed, and the average wind-induced response and fluctuating wind-induced response of panel structure of high-rise buildings are obtained. Therefore, the stability analysis of the panel structures of high-rise buildings under continuous vibration is realized. The experimental results show that the designed BIM model can ac-

收稿日期:2017-08-20

基金项目:本文系河南省科学技术厅项目“基于 LMD 的非线性结构系统识别”(2015508)

作者简介:王娟(1978—),女,河南唐人,硕士,讲师,研究方向:建筑设计及理论、建筑 BIM。E-mail:wjuan5637@sina.com。

curately analyze the acceleration and displacement time history of high-rise buildings under continuous vibration, and compared with traditional methods, the proposed method judges the stability of panel structures under continuous vibration more accurately.

Key words: high-rise building; continuous vibration; panel; structure

0 引言

建材种类、结构概念以及施工手段日新月异,为人类的生活提供了极大地便利,但同时城市的承载力已经超出负荷。如今高层楼房和特高层楼层层出不穷,数量以及质量方面双重发展,这主要源于现代科技的不断革新与飞速进步。新型高强度且轻柔的建筑材料使得造型奇特、结构繁琐的高层建筑以及特高层建筑物得以实现,高度不断更新。高层建筑壁板结构稳定性是一个重点突出的问题,壁板结构在风动力作用下受压面的稳定性尤其受到关注。基于这一类状况,对高层建筑壁板结构在各种外界因素的作用下是否安全、稳定、宜居的探究分析被提上日程。风荷载是影响建筑物关键荷载中的一种,它具有屡次振动、时间久、振幅小的特点,所以日积月累的损坏了建筑物壁板结构,直至楼体破裂损伤。分析风荷载下连续振动的高层建筑壁板结构的稳定性,具有重要的应用意义。通过 BIM (Building Information Modeling) 管理平台实现工程信息、技术系统化、体制化,使得工程的进度、费用、质量监管有理可依,高效便捷。文章设计高层建筑在连续振动下的壁板结构失稳定 BIM 模型,为高层建筑壁板结构稳定性控制提供可靠的分析依据。

1 高层建筑在连续振动下的壁板结构 BIM 模型设计

BIM 是一种自动化技术的实现过程,本文设计了高层建筑在连续振动下的壁板结构失稳定 BIM 模型,设计过程中能够实现项目的建模、结构以及可视化设计;施工过程中,能够对高层建筑壁板结构实施碰撞监测^[1]、项目现场控制以及方案改进等处理;运行过程中,能够对高层建筑设备以及运营方案实施改进,并且产生连续振动下高层建筑的应急策略。Revit 软件是为 BIM 构建的,是 BIM 数据塑造平台,可帮助建筑设计师设计、建造和维护质量更好、能效更高的建筑。采用 Revit 可以塑造建筑模型,可将数据反馈到结构分析软件以及不同类型工程分析类软件内,提高 BIM 模型的运用范围^[3]。BIM 技术在高层建筑壁板结构研究过程中,首先需要运用 Revit 在 BIM 核心建模软件内塑造高层建筑结构模

型,为高层建筑壁板结构有限元模型的塑造提供依据;其次,设计人员采用 SAP200 (Structure Analysis Program 2000) 有限元结构分析软件,向结构分析软件内输入建筑结构模型,分析高层建筑壁板结构在连续振动下的受理状态。基于 SAP200 软件规划高层建筑的施工图,并对高层建筑结构模型实施优化^[2]。在 SAP200 软件中,可以完成模型的创建和修改、计算结果的分析 and 执行、结构设计的检查和优化以及计算结果的图表显示和文本显示等,本文采用 SAP200 主要用来完成塑造高层建筑壁板结构有限元模型,实现高层建筑模型的转换。根据以上步骤设计连续振动下高层建筑壁板结构 BIM 模型,在此模型的基础上能够完成高层建筑规划、结构分析、造价控制以及模型监测,最终增强总体高层建筑的抗震稳定性。

1.1 塑造高层建筑 Revit 模型

高层建筑通过 Revit,基于 2.1 分析的连续振动下高层建筑风致响应情况,塑造建筑模型和结构模型。文章采用某市区某栋 29 层高的绿色建筑,楼高、楼宽以及深度分别是 117.3 m、41 m 以及 28.5 m,是框架核心筒结构。基本风压是 0.44 kN/m^2 ,该建筑结构的抗烈度是 7 度。Autodesk Revit 软件融合了建筑、结构以及机电软件,在绘图过程中将建筑工程实例当成总体项目,综合分析了高层建筑的平面图、立面图、剖面图以及三维模型,对某处以及相关项目实施同步修正。

基于当前高层建筑项目信息塑造新样本文件,将工程项目需要的构建种类实施加载^[4],并融入至该样本文件内。从新建项目内开启基于项目属性塑造的样本文件,完成高层建筑三维模型的塑造。从新建项目内采用基准面板对高层建筑的轴网实施绘制,并完成标高定位。绘制高层建筑梁以及柱过程中,驱动 Revit 项目浏览器,选择柱中结构柱和结构内的梁选项,如果没有选项,应载入族内的矩形梁。在绘制高层建筑的楼板、墙体、门以及窗过程中,项目浏览器内驱动处于待开启的平面,在常用选项卡内选择对应的选项,各构件选项如图 1 所示。

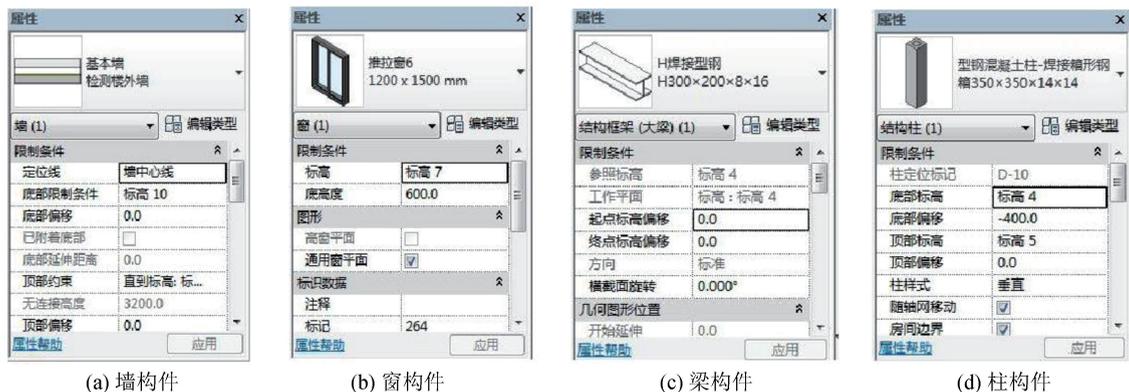


图 1 建筑构件和结构构件

Fig.1 Building components and structural members

1.2 高层建筑模型转换

为了塑造高层建筑结构荷载信息、板梁柱分析模型和承载边界规范等信息模型的结构分析模型^[5]。文章通过 CSIX Re-vit2014 接口,将 Revit 软件塑造的模型存储为 Revit Structure.exr 文件,并同 SAP2000 互导,对高层建筑结构模型实施转换,结果如图 2 所示,并对材料信息以及框架界面实施编辑修正^[6],采用 SAP2000 建模性能塑造高层建筑壁板结构的有限元实体模型,如图 3 所示。

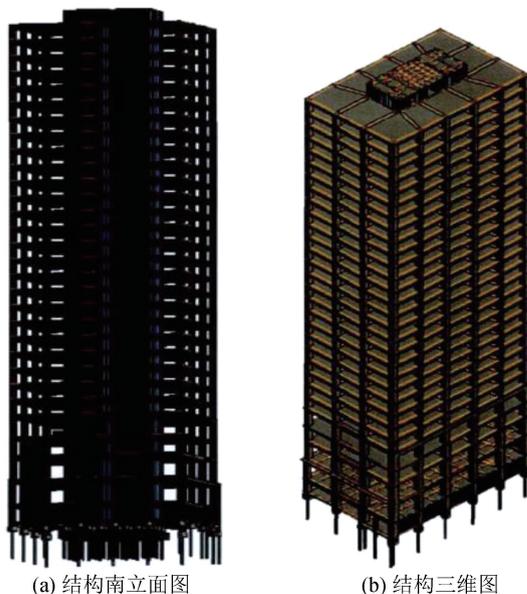


图 2 高层建筑壁板结构立面图和三维图

Fig.2 Elevation and 3D diagram of the panel structure of the high-rise building

1.3 BIM 模型的 IFOD 软件总体结构设计

IFOD 软件向 BIM 模型中融入工程设计知识以及优化知识,基于这些知识完成 BIM 模型的智能化管理。基于 BIM 的软件可实现数据结构、数据表

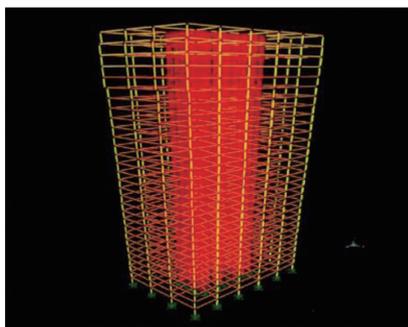


图 3 高层建筑壁板结构有限元模型

Fig.3 Finite element model of the panel structure of the high-rise build

达、优化方案以及图形自主产生方法等功能,其总体结构描述如图 4 所示,其包括人机交互模块、服务模块以及知识模块。

图 5 描述的 IFOD 软件系统运行过程如下。

(1) Tab 键设置和注册模块

对 Revit 实施二次设计后可获取后缀名是“dll”的类库文件,向相关的文件目录中存储该文件,对注册文件实施编写^[7],确保 Revit 驱动过程中完成功能的自主加载。该“注册文件”可看成是一种 XML 格式的配置文件,该种文件的后缀名是“addin”,其能够实现软件和外部命令的有效连接,驱动 Revit 后,采用 addin 文件内存储的 dll 路径实现 dll 的加载,采用 addin 内的类名塑造类的实例,对类中实现接口,获取同 addin 文件关联的相关内容。

(2) 模板优化设计模块

BIM 模型采用 IFOD 软件中服务层模板优化设计模块实现信息操作,模板优化设计自主产生模块包括支撑体系优化设计模块以及板面分布优化模块。

(3) 材料清单输出模块

BIM 模型对 IFOD 软件服务层实施操作,获取

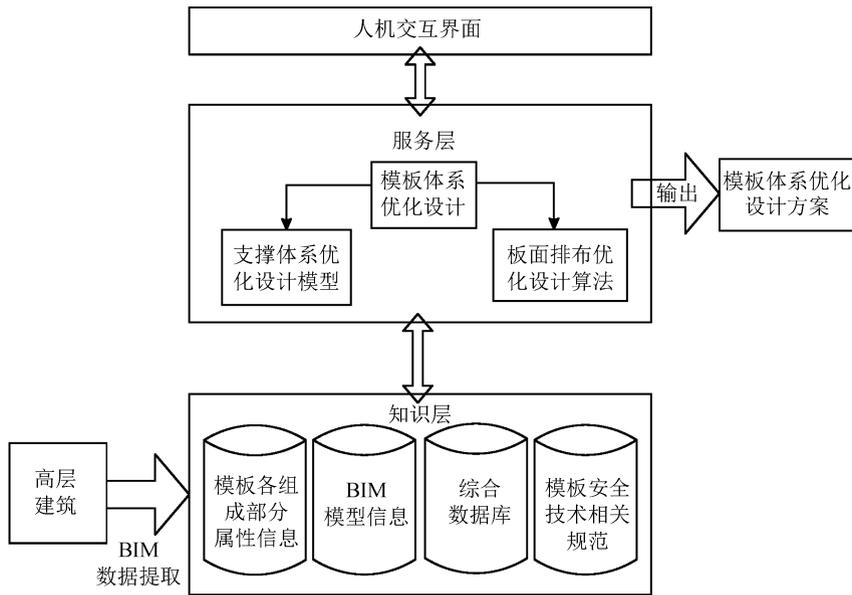


图4 IFOD 软件系统结构图

Fig.4 Structure diagram of IFOD software system

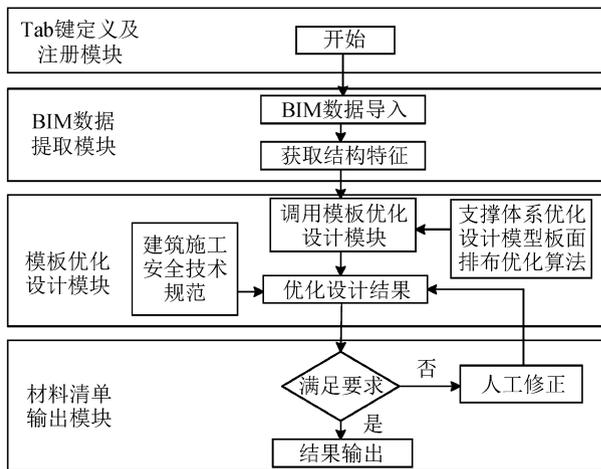


图5 IFOD 软件系统运行流程

Fig.5 Operating process of IFOD software system

模板优化待采用的有价值信息,分析待输出的改进规划测量^[8],逐次进行查询后得到最佳高层建筑连续波动下的壁板结构失稳 BIM 模型 IFOD 软件设计方法,对材料用量进行运算,形成材料清单。模板优化时产生的海量数据可看成是新知识,向综合数据库内保存这些新知识,为后续调测以及优化过程提出数据分析依据^[9]。

2 连续振动下高层建筑壁板结构稳定性分析

根据以上分析得到 BIM 模型的 IFOD 软件总体结构,实现了 BIM 模型的智能化管理。风荷载的风振效应是高层建筑结构不可回避的问题,高层建

筑受风动的影响产生振动,主要包括平均风响应和脉动风响应两种风致的影响,从而导致高层建筑壁板结构发生位移。在 BIM 模型的基础上,根据位移变化情况判断出连续振动下高层建筑壁板结构是否失稳。

2.1 平均风响应

背景响应以及共振响应构成了脉动风响应,脉动风响应以及平均风响应共同组成了高层建筑在非逆风状况下风荷载产生的总风致响应^[10],以此展开对不同响应的深入探讨。非逆风状况下,采用平均风荷载和影响函数进行运算可得出平均风致响应,用下列公式来描述:

$$\bar{r}(z) = \int_0^H \bar{p}(z_i) i(z, z_i) dz_i \quad (1)$$

式中:高层建筑壁板结构 z 点处的某一响应均值用 $\bar{r}(z)$ 来表示;对结构高度 z_i 处产生影响的线平均风力用 $\bar{p}(z_i)$ 来表示;在 z_i 高度处作用一单位力在 z 高度产生响应值用 $i(z, z_i)$ 表示,又叫做影响函数;位移、剪力、弯矩等都是影响函数的一部分,其任意高度 z 用下列函数描述:

$$i(z, z_i) = \begin{cases} \frac{\bar{r}(z) \varphi_j(z_i)}{K_j} & \text{第 } j \text{ 阶位移} \\ 1, 0 & \text{剪力(当 } z_i \geq z \text{ 时,取 } 1, \\ & \text{当 } z_i < z \text{ 时,取 } 0) \\ z_i - z, 0 & \text{弯矩(当 } z_i \geq z \text{ 时,取 } z_i, \\ & \text{当 } z_i < z \text{ 时,取 } 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: z 高度处第 j 阶振型坐标用 $\varphi_j(z_i)$ 表示;第 j 阶广义刚度用 K_j 表示。

2.2 脉动风响应

高层建筑是竖向一维悬壁结构,被称作受风敏感建筑。采用振型分解的方式使这一结构无边界自由放大^[11]。 $y_d(z, t)$ 是高度 z 点的水平位移,具体用下式表示:

$$y_d(z, t) = \sum_{j=1}^{\infty} y_{dj}(z, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(z) q_j(t) \quad (3)$$

式中:第 j 振型的动位移、 z 高度处的坐标以及广义坐标分别用 $y_d(z, t)$ 、 $\varphi_j(z)$ 以及 $q_j(z)$ 来表示。

设定质量以及刚度排列和振型 $\varphi_j(z)$ 为正交关系,那么第 j 振型公式如下:

$$q_j(t) + 2\xi(2\pi n_j) y_d(z, t) + (2\pi n_j)^2 q_j(t) = F_j(t) \quad (4)$$

式中:第 j 振型的广义脉动风荷载用 $F_j(t)$ 表示,采用下式得出结果:

$$F_j(t) = \frac{1}{M_j} \int_0^H \int_0^{B(z)} w(x, z, t) \varphi_j(z) dx dz \quad (5)$$

式中,脉动风压^[12]、 z 高度处迎风面宽度、建筑物整体高度以及第 j 振型的广义质量分别用 $w(x, z, t)$ 、 $B(z)$ 、 H 以及 M_j 表示。

$$M_j = \int_0^H m(z) \varphi_j^2(z) F_j(t) dz \quad (6)$$

式中: z 高度单位长度排列效果用 $m(z)$ 来表示。

2.3 高层建筑壁板结构位移分析

一般情况下,在建筑壁板结构研究方面,把那些外观构造比较整齐不凌乱的建筑结构看成是等截面的连续结构加以探究和处理^[13],因为这些建筑随着高度的增加其硬度以及质量不会改变。依据国家目

前关于建筑结构的规定及资料能够计算出高层建筑非逆风情况下的位移^[14],从而判断出连续振动下高层建筑壁板结构是否失稳。

由于受到平均风的影响,用式(7)表示高层建筑壁板结构的位移:

$$y_{zj} = \frac{v_{s1} \varphi_1(z) \omega_0}{\omega_1^2} \cdot \frac{\mu_s l_x}{m} \quad (7)$$

式(8)表示受到脉动风影响的高层建筑壁板结构的位移:

$$y_{zd} = \frac{\xi_1 v_{s1} \varphi_1(z) \omega_0}{\omega_1^2 \bar{r}(z)} \cdot \frac{\mu_s l_x}{m} \cdot F_j(t) + y_{zj} \quad (8)$$

式中:第一振型影响系数、脉动增大系数、脉动影响系数分别用 $\phi_1(z)$ 、 ξ_1 、 $\bar{r}(z)$ 来表示;第一振型对应的圆频率、基本风压、风荷载体形系数分别用 ω_1 、 ω_0 、 μ_s 来表示;结构迎风面的宽度、单位高度结构的质量、脉动风振系数分别用 l_x 、 m 、 v_{s1} 来表示。若位移 $y_{zd} < 0$,则表示高层建筑壁板结构已经失去稳定性,若位移 $y_{zd} \geq 0$,则表示高层建筑壁板结构处于稳定的状态。

根据以上步骤可判断出在连续振动下高层建筑的壁板结构是否还处于稳定的状态,从而有效的避免因壁板结构的失稳造成建筑损坏现象发生。

3 实验分析

3.1 风致响应时程检测结果

实验向 SAP2000 内输入脉动风致响应时程曲线,对本文设计的 BIM 模型性能实施监测,获取某高层建筑在风致响应时连续振动下的结构振动响应时程结果,实验高层建筑结构在顺风向的变形情况如图 6 所示。

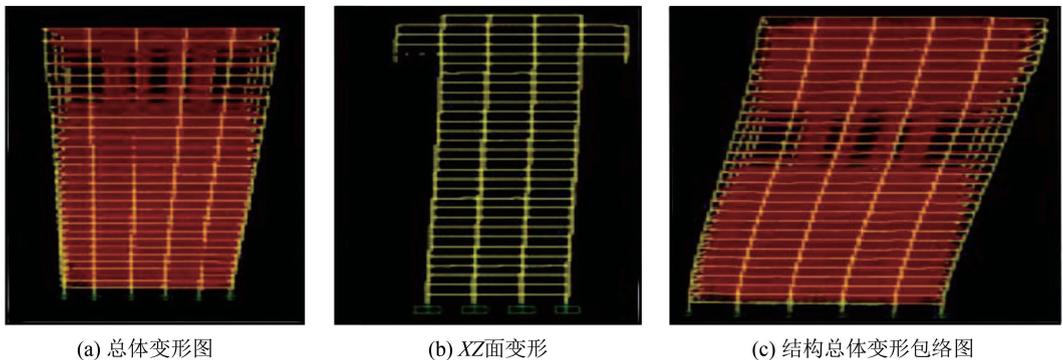


图 6 连续振动下高层建筑结构变形情况

Fig.6 Deformation of the high-rise building under continuous vibration

根据图 6 可知,连续振动下高层建筑变形呈现上剪下弯的状态,满足高层建筑在水平振动下的变

形特征,说明本文设计的 BIM 模型进行连续振动下的高层建筑壁板结构失稳性研究是有效的。

加载地震振动时程曲线,通过本文 BIM 模型中的 SAP2000 实施运算后,输出实验高层建筑全部楼层数据,如表 1 所列。

表 1 楼层剪力值

Table 1 Shear force value of each floor

楼层	剪力值/kN	楼层	剪力值/kN	楼层	剪力值/kN
1	3 563.517	11	2 747.286 8	21	1 514.123
2	3 503.611 8	12	2 638.786 6	22	1 347.262
3	3 442.811 6	13	2 524.114 8	23	1 257.548
4	3 373.082 6	14	2 419.622 8	24	1 046.755
5	3 302.058 4	15	2 367.331 8	25	998.635 2
6	3 222.527 7	16	2 165.334 7	26	763.447 1
7	3 137.354 7	17	2 037.757 4	27	673.528 8
8	3 046.008 4	18	1 996.587 4	28	506.216 7
9	2 998.554 8	19	1 773.767 2	29	337.596 8
10	2 853.586 8	20	1 633.605 8		

基于表 1 给出的楼层剪力值,得到楼层剪力数据曲线如图 7 所示。

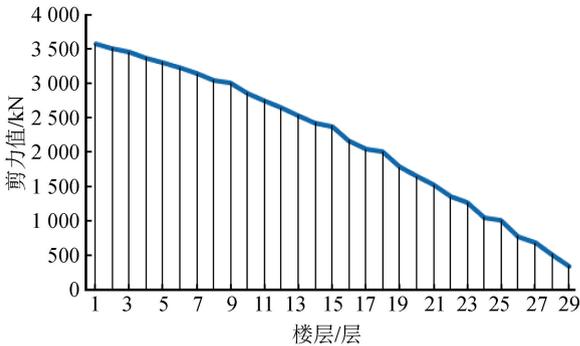


图 7 楼层剪力曲线

Fig.7 Shear force curve of each floor

表 2 楼层弯矩值

Table 2 Bending moment value of each floor

楼层	弯矩值 / (kN · m)	楼层	弯矩值 / (kN · m)	楼层	弯矩值 / (kN · m)
1	212 756.236 7	11	98 835.434 8	21	29 983.53
2	202 364.584 5	12	96172.043 8	22	24 383
3	188 176.312 8	13	89 676.795 2	23	19 684.57
4	176 225.772 6	14	80 801.131 8	24	15 246.7
5	164 042.724 2	15	72 236.638 5	25	11 056.16
6	152 348.125 3	16	64 072.138 8	26	8 622.688
7	143 306.685 2	17	56 332.241 7	27	5 753.3
8	132 263.123 7	18	49 028.386	28	3 436.285
9	130 203.627 7	19	42 163.425 8	29	1 685.303
10	119 653.607 7	20	35 763.588 4		

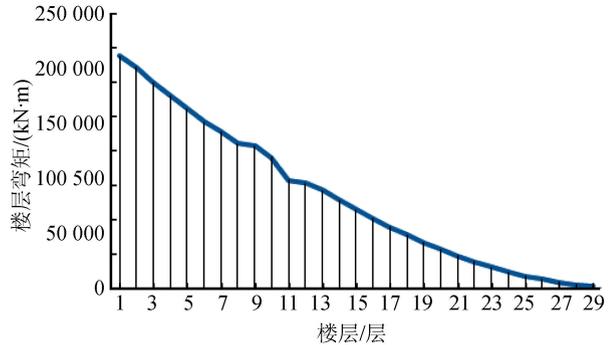


图 8 楼层弯矩曲线

Fig.8 Bending moment curve of each floor

法运算下的高层建筑楼层剪力曲线和楼层弯矩曲线呈现均衡排列状态,且随着楼层数的增加,剪力值和楼层弯矩不断降低,最终趋近于 0,说明高层建筑楼层刚度沿高度均衡排列^[15],基本满足规范对楼层剪力以及楼层弯矩的规定,说明本文方法可有效分析连续振动下高层建筑剪力情况。

在实验高层建筑 20 层和 29 层分别选取一点,获取的加速度时程曲线如图 9 所示。

分析图 7 和图 8 两个曲线图,能够得到本文方

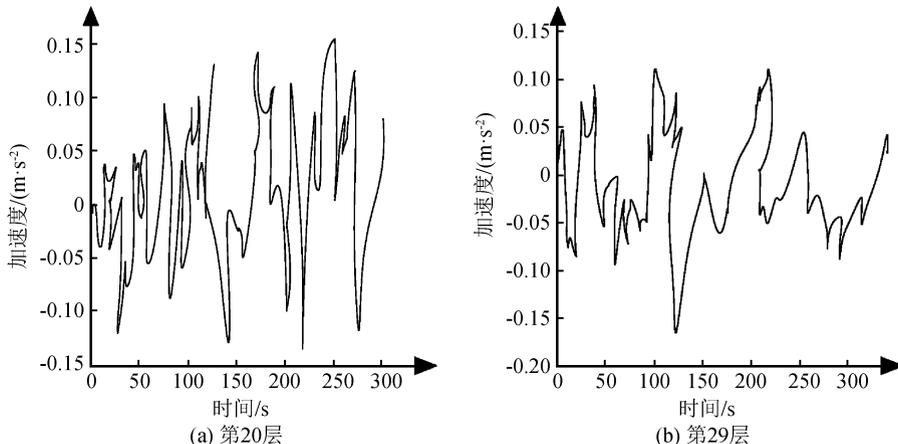


图 9 不同层加速度时程曲线

Fig.9 Acceleration time-history curves of different floors

第 20 层高度以及 29 层高度处的加速度时程响应区间分别是 $[-0.129\ 0, 0.119\ 4]$ m/s^2 和 $[-0.154\ 1, 0.128\ 1]$ m/s^2 。

第 20 层以及 29 层高度处位移时程曲线如图

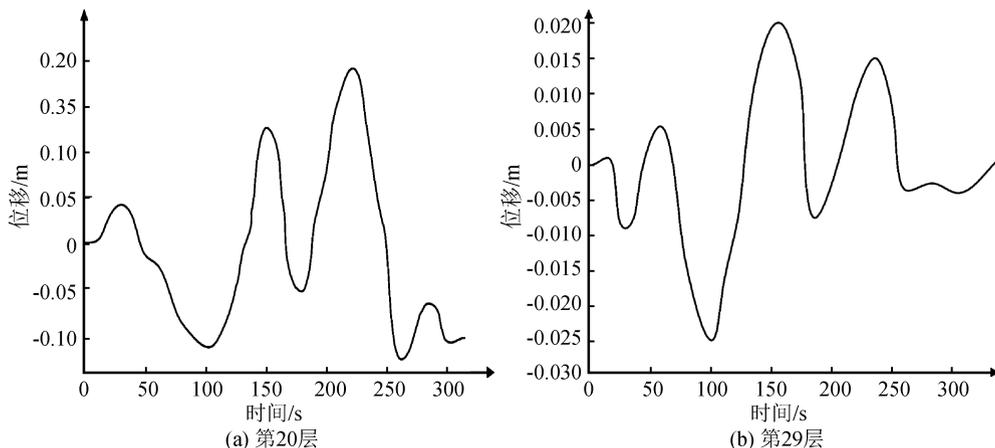


图 10 不同层位移时程曲线

Fig.10 Displacement time-history curves of different floors

3.2 加速度分析

实验依据《高层混凝土结构技术规程》中设置高层建筑结构顶点最高加速度 α_{\max} 的取值范围,当高层建筑是公寓和住宅时, α_{\max} 值是 $0.15\ \text{m/s}^2$,当高层建筑是办公和旅馆时, α_{\max} 值是 $0.25\ \text{m/s}^2$ 。

则第 20 层和 29 层高度加速度时程响应区间分别是 $[-0.129\ 0, 0.119\ 4]$ m/s^2 和 $[-0.154\ 1, 0.128\ 1]$ m/s^2 。能够看出高度越高,加速度均值越高。采用国家规范运算出的持续振动下高层建筑顶点加速度值是 $0.14\ \text{m/s}^2$,而采用本文方法获取的持续振动下实验高层建筑加速度时程区间是 $[-0.154\ 1, 0.128\ 1]$ m/s^2 ,满足规范要求,说明本文方法运算的持续振动下高层建筑加速度时程值是准确的。

3.3 位移分析

实验基于我国的《高层混凝土结构技术规程》,设置的高层楼层层间最高水平位移同层高比 δ/h 限值如表 3 所列。

表 3 楼层剪最高位移同层高之比的限值

Table 3 Ratio of maximum inter-story displacement to the height

结构体系	δ/h 限值
框架	1/550
框架-剪力墙、框架-核心筒	1/800
筒中筒、剪力墙	1/1 000
框架结构外的转换层	1/1 000

本文方法下实验高层建筑第 20 层以及 29 层的位移时程响应区间分别是 $[-0.013\ 7, 0.017\ 1]$ m/s^2 和 $[-0.026\ 5, 0.018\ 9]$ m/s^2 ,可以看出位移响应均

10 所示。

第 20 层高度以及 29 层高度处的加速度时程响应区间分别是 $[-0.013\ 7, 0.017\ 1]$ m/s^2 和 $[-0.026\ 5, 0.018\ 9]$ m/s^2 。

值随着高度的提升而提升,位移波动状态也存在一定的差异。高度越高,持续振动下负荷均值越高,使得高位置处位移比低位置处位移均值高。采用国家规范运算出的连续振动下高层建筑顶点位移值是 $0.038\ \text{m}$,本文方法运算获取的位移时程区间是 $[-0.026\ 5, 0.018\ 9]$ m/s^2 ,其满足规定的最高位移同层高间的限值要求,说明本文方法运算的持续振动下高层建筑位移时程变化是有效的。

通过位移值计算对比,比较本文方法与传统方法的失稳性判断准确度,结果如图 11 所示。

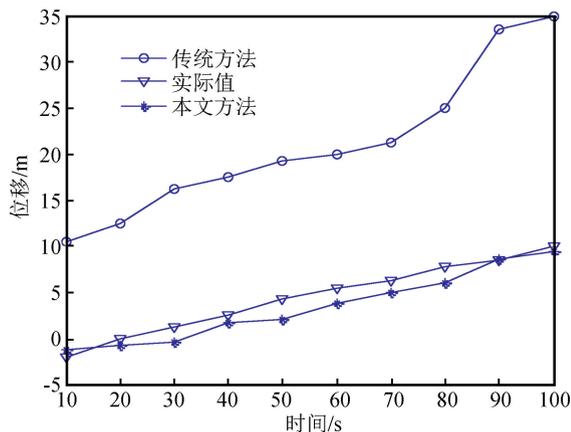


图 11 位移值计算结果对比图

Fig.11 Comparison between calculation results of displacement

根据图 11 可知,本文方法计算得到的位移值与实际值基本相同,而传统方法与实际值的差距较大,

表明了本文方法可有效的判断高层建筑在连续振动下的壁板结构是否失稳。

4 结 论

科技的飞速发展,增加了高层建筑的使用量,其结构的稳定性直接关系人们的生命安全。传统高层建筑壁板结构失稳判断结果存在一定误差,文章设计高层建筑在连续振动下的壁板结构失稳 BIM 模型。通过 Revit 塑造高层建筑模型和结构模型,同 SAP2000 互导,对高层建筑结构模型实施转换,利用 IFOD 软件向 BIM 模型中融入工程设计知识以及优化知识,基于这些知识完成 BIM 模型的智能化管理。基于 BIM 模型分析连续振动下高层建筑壁板结构的风致响应,实现连续振动下高层建筑壁板结构的稳定性准确分析。实验结果表明,本文方法计算得到的连续振动下壁板结构位移值趋近于实际值,表明了所提方法的优越性,为建筑工程的研究奠定了基础。

参考文献(References)

[1] 相军.钢筋混凝土建筑抗连续震动壁板结构分析[J].科学技术与工程,2016,16(32):283-287.
XIANG Jun.Reinforced Concrete Construction Continuous Vibration Resistance Wall Structure Analysis[J].Science Technology and Engineering,2016,16(32):283-287.

[2] 董玲燕,许继军,马瑞,等.基于 GIS 网络模型的水资源优化配置系统设计与实现[J].水利水电技术,2016,47(12):7-11.
DONG Lingyan,XU Jijun,MA Rui,et al.Design and Realization of Gis Network Model-based Optimal Allocation System of Water Resources[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(12):7-11.

[3] 杨磊,申波,周世明,等.新型斜柱转换结构的抗震性能分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(6):67-70,108.
YANG Lei,SHEN Bo,ZHOU Shiming,et al.Different Limb Thickness Ratio on Seismic Performance of New Type Inclined Column Transferring Structure[J].Journal of Guizhou University (Natural Science),2016,33(6):67-70,108.

[4] 王新妮,吴海波.钢筋混凝土建筑在连续震动下的壁板结构破坏程度分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1018-1023.
WANG Xinni,WU Haibo.Analysis of Failure Degree of Reinforced Concrete Buildings Under Continuous Vibration[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1018-1023.

[5] 张社荣,胡安奎,王超,等.大型地下洞室群施工期围岩力学参数实时动态反演[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):189-195.
ZHANG Sherong,HU Ankui,WANG Chao.Real-time Dynamic Inversion of Surrounding Rock Mechanical Parameters During Construction of Large-scale Underground Cavern Group [J].Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(3):189-195.

[6] LYUBIMOV D V,IVANTSOV A O,LYUBIMOVA T P,et al.Numerical Modeling of Frozen Wave Instability in Fluids with High Viscosity Contrast[J].Fluid Dynamics Research,2016,48(6):061415.

[7] 王存福,赵敏,葛彤.考虑失稳模式的环肋圆柱壳结构优化设计[J].上海交通大学学报,2014,48(1):56-63.
WANG Cunfu,ZHAO Min,GE Tong.Optimal Design of Ring-Stiffened Cylindrical Shell Considering Instability Mode [J].Journal of Shanghai Jiaotong University,2014,48(1):56-63.

[8] 唐怀平,李鹏,杨翊仁.运动约束亚音速二维粘弹性壁板的非线性颤振[J].西南交通大学学报,2015,50(2):388-392.
TANG Huaiping,LI Peng,YANG Yiren.Nonlinear Flutter of a Two-dimensional Viscoelastic Plate with Motion Constraints in Subsonic Flow[J].Journal of Southwest Jiaotong University,2015,50(2):388-392.

[9] 徐元铭,李松泽.整体次加筋壁板屈曲载荷近似计算方法[J].北京航空航天大学学报,2015,41(3):369-374.
XU Yuanming,LI Songze.Approximate Calculation Method of Buckling Load on Integral Sub-stiffened Panel[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2015,41(3):369-374.

[10] 郭俊,关志东,黎增山,等.带口盖加筋复合材料壁板剪切性能[J].复合材料学报,2016,33(2):399-407.
GUO Jun,GUAN Zhidong,LI Zengshan,et al.Shear Properties of Composite Stiffened Panel with Cover[J].Acta Materialiae Compositae Sinica,2016,33(2):399-407.

[11] 邵青,何宇廷,张腾,等.铝合金搅拌摩擦焊接加筋板剪切稳定性性能研究[J].机械工程学报,2014,50(20):93-99.
SHAO Qing,HE Yuting,ZHANG Teng,et al.Study on Stability Performance of Friction Stir Welded Aluminum Alloy Stiffened Panel under Shear Load[J].Journal of Mechanical Engineering,2014,50(20):93-99.

[12] GANDIKOTA G,CHATAIN D,AMIROUDINE S,et al.Frozen-wave Instability in Near-critical Hydrogen Subjected to Horizontal Vibration under Various Gravity Fields[J].Physical Review Estatistical Nonlinear & Soft Matter Physics,2014,89(1):012309.

[13] 杨党辉,苏原,孙明.基于 BIM 技术的结构设计中的数据转换问题分析[J].建筑科学,2015,31(3):31-36.
YANG Danghui,SU Yuan,SUN Ming.Analysis of Data Exchange Issues in Structural Design Based on BIM[J].Building Science,2015,31(3):31-36.

[14] 金迪,寇艳荣.复合材料加筋壁板结构选型设计[J].复合材料学报,2016,33(5):1142-1146.
JIN Di,KOU Yanrong.Structural Style-selection Design of Composite Stiffened Panel[J].Acta Materialiae Compositae Sinica,2016,33(5):1142-1146.

[15] 陈昭庆,武岳,孙晓颖.封闭式单向张拉膜结构气弹失稳机理研究[J].建筑结构学报,2015,36(3):12-19.
CHEN Zhaoqing,WU Yue,SUN Xiaoying.Research on Aeroelastic Instability Mechanism of Closed-type One-way Tensioned Membrane[J].Journal of Building Structures,2015,36(3):12-19.