

马吉福. 建筑主结构外部装饰抗震加固方法研究[J]. 华南地震, 2019, 39 (4): 130-135. [MA Jifu. Study on Seismic Reinforcement Method for External Decoration of Main Structure of Buildings[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(4): 130-135]

建筑主结构外部装饰抗震加固方法研究

马吉福

(青海建筑职业技术学院建筑与环境艺术系, 西宁 810000)

摘要: 研究新的建筑主结构外部装饰抗震加固方法, 从地震荷载与风荷载两方面考虑建筑主结构外部装饰抗震加固, 以某市超高层建筑为研究原型, 利用 STRAND 7 有限元软件构建包括外部装饰条与附近建筑的空间几何模型, 选取 EI Centro 波与 LMA Kobe 波以及一条 III 类场地的人工地震波作为工况输入; 采用标准大涡模拟研究原型模拟流场的湍流效应, 求解不同风向角下的流场分布, 获取建筑主结构外部装饰所受的风荷载。仿真分析结果显示, 外部装饰条的切向风荷载系数分布存在拐角区域大、平顺区域小的特征; 原型结构所受风荷载受斜风向影响高于水平风向, 外部装饰以低于 10% 的幅度提升原型结构所受风荷载, 均布布置的外部装饰会降低整体结构的风荷载; 8 度罕遇工况输入下, 北向纵墙中部外部装饰最大位移角为 1/42, 最大位移值约为 9.5 mm, 变形较低, 且建筑主结构南向最大层间位移角为 1/177, 位移值约为 8.5 mm, 震后残余变形小, 抗震效果较好。

关键词: 建筑; 主结构; 外部装饰; 抗震加固; 风荷载系数; 大涡模拟

中图分类号: TU312.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)04-0130-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.04.019

Study on Seismic Reinforcement Method for External Decoration of Main Structure of Buildings

MA Jifu

(Department of Architecture and Environmental Art, Qinghai College of Architectural Technology, Xining 810000, China)

Abstract: The paper studies the new method of seismic strengthening of the external decoration of the main structure of the building, and considers the seismic strengthening of the external decoration of the main structure of the building from two aspects of seismic load and wind load. Taking a city's super high-rise building as the research prototype, the finite element software STRAND 7 was used to construct a spatial geometric model including external decorative strips and nearby buildings with the EI Centro wave and LMA Kobe wave and an artificial seismic wave of a type III site selected as the working condition input; the standard large eddy simulation was used to study the turbulence effect of the simulation flow field, and the flow field distribution at different wind directions was solved to obtain the wind load on the exterior decoration of the main structure.

收稿日期: 2019-02-19

作者简介: 马吉福(1977-)男, 本科, 讲师, 主要从事建筑装饰工程研究。

E-mail: mjf@qhavtc.com.

Simulation results show that the tangential wind load coefficient distribution of the exterior decorative strip has the characteristics of large corner area and small smooth area; the influence of oblique wind direction on wind load of the prototype structure is higher than that of the horizontal wind direction. The external decoration increases the wind load on the prototype structure by less than 10%. The uniformly distributed external decoration will reduce the wind load on the overall structure. Under 8-degree rare working condition input, the maximum displacement angle of the external decoration in the middle of the northward vertical wall is $1/42$, and the maximum displacement value is about 9.5 mm with relatively low deformation, and the maximum inter-layer displacement angle of the main structure in the south direction is $1/177$ with the displacement value of 8.5 mm. The residual deformation after the earthquake is small, and the seismic effect is good.

Keywords: Building; Main structure; External decoration; Seismic reinforcement; Wind load coefficient; Large eddy simulation

0 引言

当前,随着经济的快速发展,建筑行业的发展也较为迅速,建筑结构尤其是超高层建筑结构在提供其实用功能的同时,也成为具有艺术性与美学的艺术表现形式^[1-2]。为提升建筑结构的艺术性,丰富建筑主结构的视觉效果,一般情况下会在建筑主结构外围设置外部装饰,其尺寸也随着建筑美学要求的提升而增长,同时外部装饰的空间造型也越来越复杂,导致建筑主结构外部装饰对地震荷载表现的越来越敏感。

以往在研究建筑主结构外部装饰抗震加固方法时多采用各有限元分析软件,在设定输入工况条件下,研究不同工况下建筑主结构外部装饰的抗震加固方法^[3-6]。此类方法在研究建筑主结构外部装饰抗震加固的过程中,只考虑地震工况,忽略了超高层建筑受风荷载的影响,因此研究结果不全面。为解决上述问题,研究新的建筑主结构外部装饰抗震加固方法,从地震荷载与风荷载两方面考虑建筑主结构外部装饰抗震加固,得到更全面的研究结果。

1 建筑主结构外部装饰抗震加固方法

1.1 建筑主结构外部装饰模型构建

1.1.1 原型简介

以某市超高层建筑为研究原型,其建筑主结构表层设计包含复杂的外部装饰条,外部装饰条的高度与宽度分别为 100 m 和 750 mm;平面四个面各设有外部装饰条 60 根,共 240 根;研究原型

总高 275 m,建筑主结构 235 m 以下楼层和 235 m 以上楼层在布置装饰条时分别采取均匀布置方式和空间交错布置方式。考虑到布置装饰条的尺寸大、造型复杂等饮食,则在设计建筑主结构外部装饰时,应全面研究其抗震加固性能,该建筑原型的抗震层间位移角阈值为 $1/300$,位移角阈值为 12 mm。图 1 中描述的是研究原型主结构外部装饰布置图。

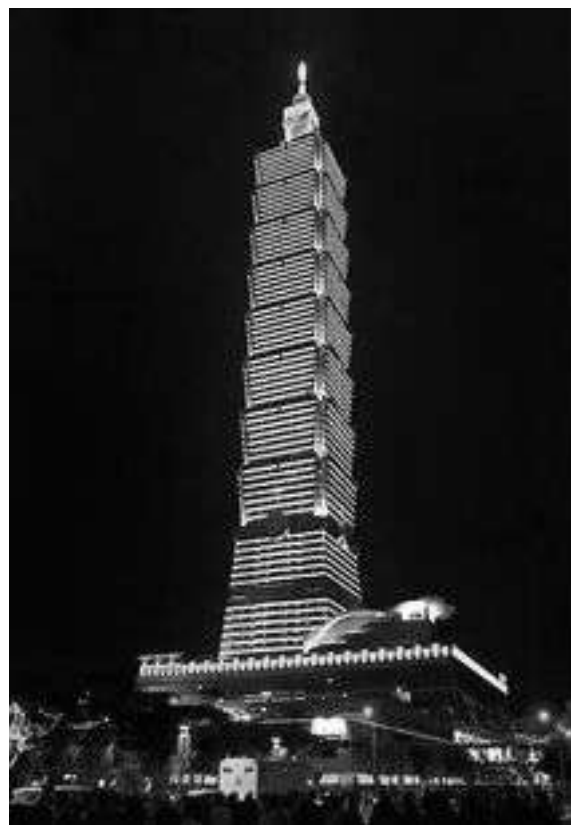


图 1 研究原型主结构外部装饰布置图

Fig. 1 The external decorative layout of the prototype main structure

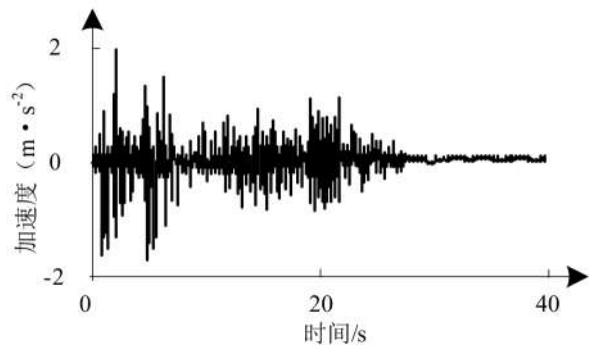
1.1.2 模型建立及网格划分

研究原型所处位置为城区, 所在区域抗震设防烈度为 8 度, 兼顾其附近 450 m 范围内具有代表性的建筑物, 采用 STRAND 7 有限元软件构建整体区域模型, 模型中研究原型的主结构外部装饰条结构也根据实际尺寸设置生成。分割研究原型空间区域, 使其形成不同小区域, 通过结构化网络划分不同小区域^[9-10], 得到研究原型空间区域的流场网格。为了完成研究原型外部装饰的完全仿真, 需要通过非结构化的网格实现原型空间区域的流场网格的局部精细化加密处理。

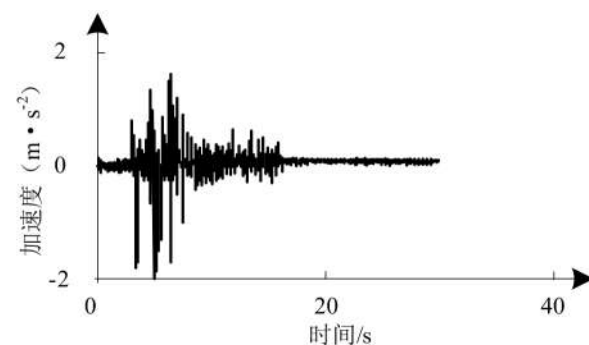
1.2 抗震加固方法研究

1.2.1 地震波加载制度

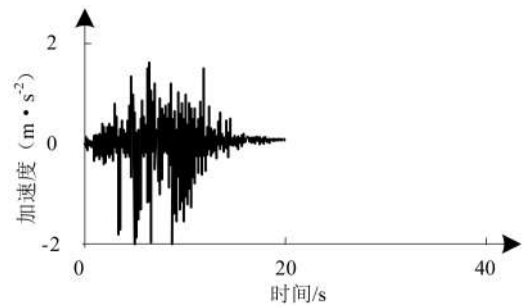
依照建筑抗震设计相关要求, 研究原型所处区域的抗震设防烈度为和场地类别分别为 8 度和 II 或 III 类, 因此在研究其外部装饰抗震加固性能时采用 II—III 类场地两条具有代表性的地震波: EI Centro 波与 LMA Kobe 波以及一条 III 类场地的人工地震波, 作为地震波工况输入^[11]。图 2 描述的是三条地震波的加速度时程与反应谱。



(a)EI Centro 波加速度时程
(a)EI Centro wave acceleration time history



(b)LMA Kobe 波加速度时程
(b)LMA Kobe wave acceleration time history



(c)人工波加速度时程
(c)Artificial wave acceleration time history

图 2 地震波

Fig. 2 Seismic wave

1.2.2 流体控制方程

研究建筑主结构外部装饰抗震加固时, 通过规范大涡模拟研究原型模拟流场的湍流效应^[12], 该研究过程通过控制方程和模型, 得到大尺度漩涡以及小尺度涡, 对原型模拟流程形成的干扰效应。

采用大涡模拟求解过滤器过滤后的控制方程中动量方程表达式为:

$$\frac{\partial(\theta \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\theta \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{n}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varepsilon \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

式(1)内, x_i 和 x_j 分别表示大尺度漩涡和小尺度涡; ε 、 θ 和 n 分别表示流体运动粘性、流体密度和流场压力; $u_i u_j$ 和 τ_{ij} 分别表示流场的速度分量和亚格子尺度应力, 其中存在上划线的量为滤波后的场变量, τ_{ij} 可描述流场受小尺度涡的影响^[13]。

依照 Smagorinsky 的标准 SGS 模型, 设 SGS 应力存在以下形式:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = 2 \varepsilon_t \bar{S}_{ij} \quad (2)$$

式(2)内, $\varepsilon_t = (Z_s \Delta)^2 |\bar{S}|$, Δ 、 Z_s 和 \bar{S} 分别表示沿轴方向的网格尺寸, 和 Smagorinsky 常数, 取值分别为 $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$ 和 0.1; $|\bar{S}|$ 和 $|\bar{S}|_{ij}$ 分别等于 $\sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$ 和 $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ 。

通过三角级数叠加的谐波合成方法生成来流风速^[14], 利用快速傅里叶变换技术提升来流风速生成效率, 最终得到脉动风速入口, 入口风速描述为:

$$V_j(t) = 2 \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_{ml})| \sqrt{\Delta \omega} \cdot \cos[\omega_{ml} t - \kappa_{jm}(\omega_{ml}) + \phi_{ml}] \quad (3)$$

式(3)内, w_{ml} 和 θ_{ml} 分别表示双索引频率和区

间 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的任意相位角^[15]; $\Delta\omega=\omega_u/N$, 其中 ω_u 表示截断频率。以风洞试验的均匀湍流拟合合成的 Karman 谱为计算目标谱, 表达式为:

$$S_u(n) = S_v(n) = \frac{4\sigma^2 L_x/R_i}{\left\{1 + 70.8(dL_x/R_i)^2\right\}^{5/6}} \quad (4)$$

式(4)内, R_i 和 σ 分别表示平均速度和均方差; L_x 和 d 分别表示积分尺度和频率。

2 仿真分析

为验证本文研究的建筑主结构外部装饰抗震加固方法的有效性, 在 STRAND 7 有限元软件中进行一系列相关仿真分析, 分析结果如下。

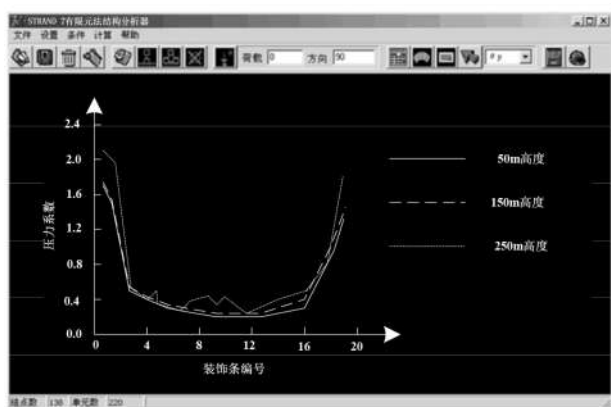
2.1 不同高度区域装饰条风荷载系数统计分析

以全部风向角下的极值作为各部位装饰的风荷载参数取值。研究原型主结构外部装饰承受的

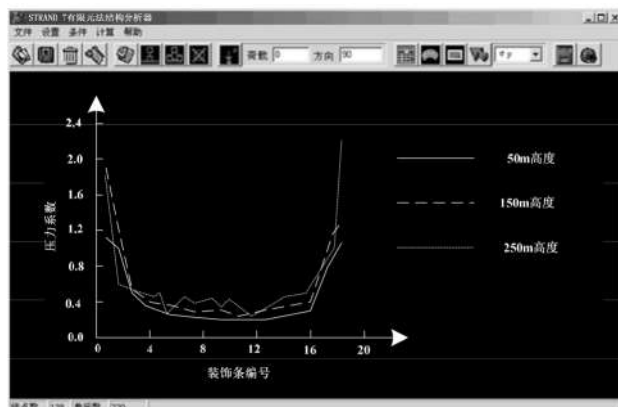
风荷载由法向荷载与切向荷载两部分组成, 法向风荷载同风吸力间具有较高的关联性, 则仅考虑正值风荷载的极大值; 切向风荷载影响下, 研究原型主结构外部装饰受正负风荷载影响相同, 因此以风荷载绝对值的最大值作为切向风荷载系数, 根据法向风荷载与切向风荷载可获取不同高度区域各装饰条的风荷载系数极值分布。切向风荷载影响下各高度区域、各朝向下研究原型主结构外部装饰条风荷载体型系数对比曲线如图3所示。

分析图3可得, 各方向装饰条体型系数均具有相同规律性, 与位于研究原型主结构外部倒角的圆弧区域的装饰条体型系数相比, 处于研究原型主结构外部中心部位的装饰条体型系数显著降低, 说明研究原型主结构外部装饰在风荷载影响下最不利区域为圆弧区域。

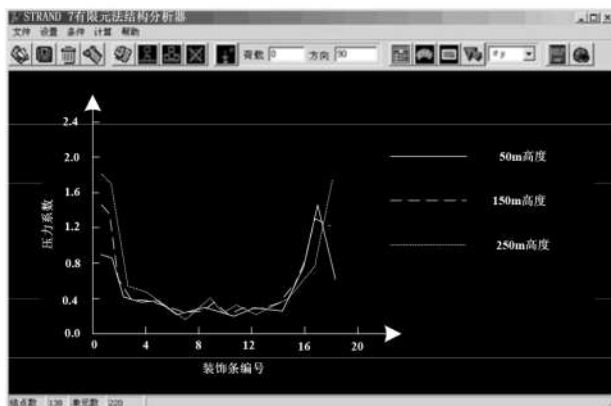
在研究原型主结构0~235 m区域, 随着研究原型主结构高度的提升, 外部装饰风荷载体型系数也有所提升, 在研究原型主结构高度达到100 m



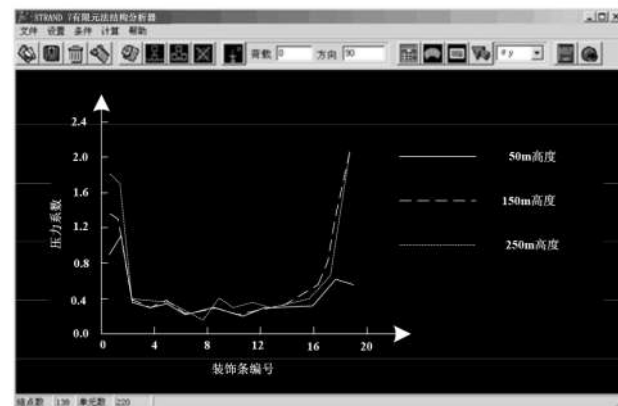
(a) 东向
(a) Eastward



(b) 南向
(b) South



(c) 西向
(c) Westward



(d) 北向
(d) North

图3 各区域装饰条切向风荷载体型系数对比

Fig. 3 Comparison of tangential wind load carrier shape coefficient of decorative strips in different areas

后,外部装饰风荷载体型系数改变较小。形成这种现象主要是因为,与较高部位装饰条受附近地形建筑的影响相比,高度较低的部位装饰条受附近地形建筑影响更显著。研究原型结构 235~275 m 区域中,风荷载体型系数随研究原型高度提升而变化的规律性降低,形成该种现象是由于外部装饰高度上的曲线呈现明显地形变,使得流场变化显著,导致数值结果差距相对较明显。

2.2 装饰条对结构整体风荷载影响

风向角着重水平风向与斜风向,以 150 m 区域(装饰条均匀布置区域)与 250 m 区域(装饰条曲线布置区域)为研究区域,得到顺风向研究原型主结构所受风荷载体型系数,如表 1 所示。

表 1 装饰条对结构整体风荷载影响列表

Table 1 List of influences of decorative strips on the overall wind load of the structure

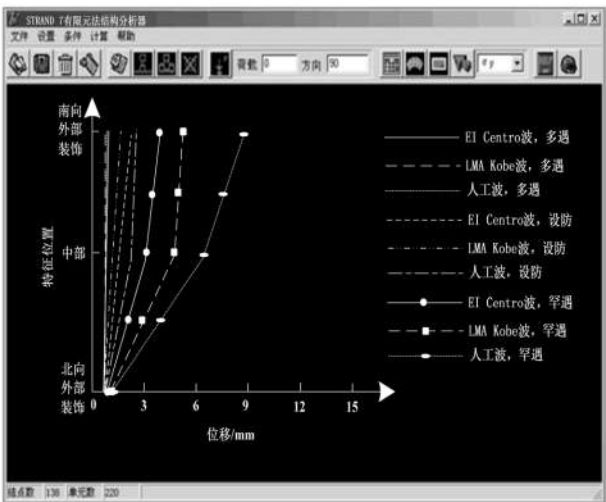
| 风荷载体型系数 | 水平风向 | | 斜风向 | |
|---------|------|------|------|------|
| | 150m | 250m | 150m | 250m |
| 无装饰条 | 0.89 | 0.97 | 1.12 | 1.27 |
| 有装饰条 | 0.95 | 1.02 | 1.20 | 1.35 |
| 偏差/% | 6.74 | 5.15 | 7.14 | 6.30 |

表 1 显示:受斜风向影响下,研究原型整体结构所受的风荷载与受水平风向影响时相比,提升 27%左右;研究原型整体结构所受的风荷载受装饰条的影响有所提升,提升幅度低于 10%;装饰条均匀布置状态下与曲线布置状态下相比,研究原型整体结构的风荷载有所下降,表明简单的装饰条布置方式会降低气流流动复杂性,也就是降低研究原型主结构外部装饰风荷载。

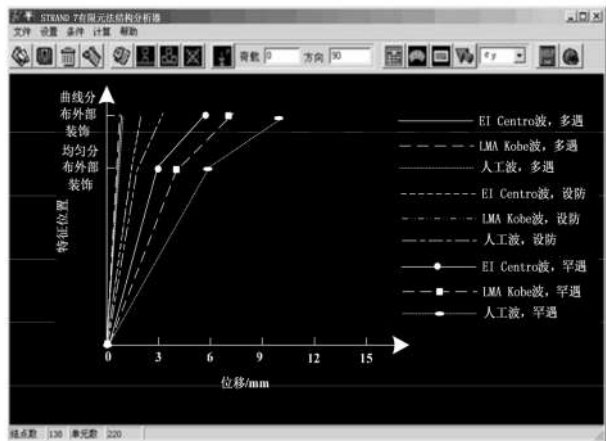
2.3 位移反应

图 4 中描述的是基于加速度积分获取的模型特征位置侧向峰值位移反应包络图。表 2 和表 3 中描述的是不同地震波输入工况下主要位置的位移角。

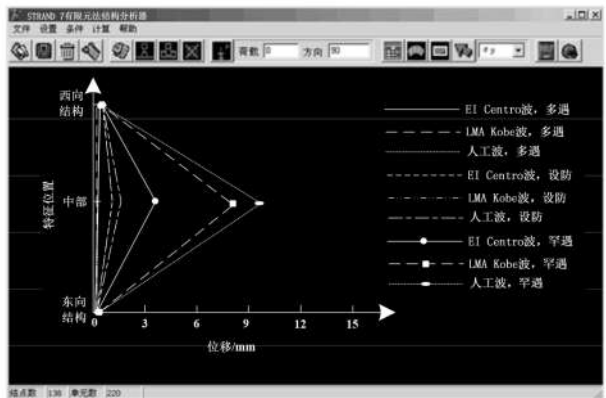
结合表 2 和表 3,在图 4(a)中 X 向输入工况状态下,南北向纵墙抗侧刚度有所不同,北向纵墙外部装饰水平位移很小,南部纵墙外部装饰水平位移较大,研究原型主结构外部装饰高度变形近似直线或南向结构外部装饰收紧的曲线;8 度罕遇工况输入下,建筑主结构南向的最大层间位移角为 1/177,最大位移值约为 8.8 mm,震后残余变形小,抗震效果较好。



(a)建筑外部装饰高度平面(X 向输入)
(a) Exterior decorative elevation plane of the building (X-direction input)



(b)建筑结构纵剖面(X 向输入)
(b) Longitudinal section of building structure (X-direction input)



(c)建筑北向纵墙外部装饰高度平面(Y 向输入)
(c) External decorative height plane of building north longitudinal wall (Y input)

图 4 模型特征剖面峰值位移包络图

Fig 4. Peak displacement envelope of characteristic profile of model

表 2 X 向输入工况下研究原型最大位移角

Table 2 Maximum displacement angle of prototype under

X direction input

| 最大位移角 | 工况多遇地震 | 设防地震 | 罕遇地震 |
|-------|--------|--------|--------|
| 建筑北向 | 1/2631 | 1/2565 | 1/1966 |
| 建筑中部 | 1/2418 | 1/728 | 1/261 |
| 建筑南向 | 1/1992 | 1/648 | 1/177 |
| 建筑顶部 | 1/2111 | 1/735 | 1/229 |

表 3 Y 向输入工况下研究原型最大位移角

Table 3 Maximum displacement angle of prototype under

Y direction input

| 最大位移角 | 工况多遇地震 | 设防地震 | 罕遇地震 |
|-------|--------|--------|--------|
| 建筑西向 | 1/2062 | 1/2014 | 1/1267 |
| 建筑中部 | 1/1429 | 1/337 | 1/42 |
| 建筑东向 | 1/2645 | 1/1467 | 1/1656 |

结合表 2 和表 3, 在图 4(b)中 X 向输入工况状态下, 受建筑结构外竖向拉杆影响, 研究原型顶部外闪受到一定控制, 8 度罕遇工况输入下, 建筑结构平面外层间位移角最大值达到 1/229, 最大位移值约为 10 mm, 未形成倒塌现象。

结合表 2 和表 3, 在图 4(c)中 Y 向输入 8 度罕遇工况状态下, 北向纵墙外部装饰高度的平面外位移曲线表现为显著外凸形, 与中部位移相比, 两端位移较小; 北向纵墙中部外部装饰最大位移角为 1/42, 最大位移值约为 9.5 mm, 变形较低。

3 结语

针对以往研究建筑主结构尤其是超高层建筑主结构外部装饰抗震加固方法中忽略风荷载影响的问题, 提出新的建筑主结构外部装饰抗震加固方法。在考虑地震波影响的基础上, 利用数值风洞模拟技术, 模拟研究原型外部装饰的流场分布数值, 分析研究原型的抗震加固性能。

(1)外部装饰条的切向风荷载系数分布存在拐角区域大、平顺区域小的特征;

(2)研究原型整体结构所受的风荷载受斜风向影响高于水平风向, 外部装饰将提升研究原型整体结构所受的风荷载 10%以下, 与曲线布置相比, 均布布置的外部装饰会降低整体结构的风荷载;

(3)X 向输入工况状态下, 北向纵墙外部装饰水平位移很小, 南部纵墙外部装饰水平位移较大, 8 度罕遇工况输入下, 建筑结构平面外层间位移角最大值达到 1/229, 位移值约为 10 mm, 未形成倒

塌现象; Y 向输入 8 度罕遇工况状态下, 北向纵墙外部装饰高度的平面外位移曲线表现为显著外凸形, 与中部位移相比, 两端位移较小。

所研究方法能够同时研究建筑主结构外部装饰所受风荷载影响和地震波工况状态下建筑主结构外部装饰抗震性能, 研究结果较全面。

参考文献:

[1] 王国新, 卢鹏洁. 非正规设计框架结构抗震加固支撑效果对比研究[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(4): 748-755.

[2] 陈玲玲, 李海鑫. 建筑装饰用 Cu-Ni 合金的腐蚀行为研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(8): 39-42.

[3] Pantelides C P, Hansen J, Ameli M J, et al. Seismic performance of reinforced concrete building exterior joints with substandard details [J]. Journal of Structural Integrity & Maintenance, 2017, 2(1): 1-11.

[4] 张旭乔, 肖绪文, 田伟, 等. 超高层建筑施工过程结构竖向变形的研究现状[J]. 施工技术, 2017, 46(16): 58-63.

[5] 郭晶, 马捷, 马宁, 等. 建筑内外墙用渗透型底漆加固性能试验方法的研究[J]. 涂料工业, 2018, 48(5): 52-56.

[6] 陈郡伟, 何文福, 吴倩芸, 等. 偏心荷载下仓储建筑隔震结构弹塑性地震响应研究[J]. 结构工程师, 2017, 33(5): 94-102.

[7] 张蓉. 建筑装饰用 Cu-6Zn 合金的表面电镀工艺与其耐腐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(11): 824-826.

[8] Deev I, Nikishin E, Kurshev E, et al. The structure and composition of samples made of carbon-fiber-reinforced plastic KMu-4I exposed for 12 years on the exterior surface of the International Space Station: 1. Macrostructure and surface composition [J]. Inorganic Materials Applied Research, 2016, 7(6): 847-854.

[9] 尹昭, 高剑平, 徐海涛, 等. 外贴耗能空腹桁架和外贴 BRB 框架加固 RC 框架结构抗震性能对比分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(1): 118-123.

[10] 张亚英, 赵春荣, 崔伟. 多层砖混建筑的轻钢结构加层设计和抗震计算模式对比研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(4): 136-140.

[11] 徐帅, 高向宇, 吴军, 等. 附加减震钢框架的加固混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(8): 25-34.

[12] 张慧娟, 李爱群, 包霞, 等. 影剧院抗震加固技术应用现状分析及发展展望[J]. 工业建筑, 2018, 48(4): 93-98.

[13] 周铁钢, 袁一鸣, 赵祥. 配筋砂浆带加固土坯墙体的抗震性能研究与实践[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 58-64.

[14] 李奉阁, 孙文晋, 郝艳. 填充抗震墙加固既有框架结构的抗震性能分析[J]. 建筑科学, 2017, 33(11): 106-111.

[15] Kaliluthin A K, Kothandaraman S. Performance evaluation of exterior beam-column joint with core reinforcement technique subjected to reverse cyclic loading [J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2017, 42(9): 1-15.