

崔莉, 吴海英. 支座沉降对大跨度钢结构连廊地震受力性能影响分析[J]. 地震工程学报, 2019, 41(2): 319-325. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.319
CUI Li, WU Haiying. Influence of Support Settlement on the Seismic Behavior of Large-span Steel Structure Corridors[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 319-325. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.319

支座沉降对大跨度钢结构连廊地震 受力性能影响分析

崔 莉¹, 吴海英²

(1. 长治职业技术学院, 山西 长治 046000; 2. 山西大学, 山西 太原 030013)

摘要: 在大跨度钢结构连廊的地震冲击影响分析中支座沉降都被忽略, 而分析其受力情况对抗震性影响至关重要。研究支座沉降对大跨度钢结构连廊在地震中的受力性能变化, 建立连廊结构在地震中的受力模型。做法为模型设定一个沉降量, 计算支座沉降时, 在地震冲击下连廊(包括钢框架和钢桁架)附加内力, 再利用结构力学方法得到连廊附加弯矩图, 得出沉降量对连廊钢框架地震冲击表达式, 利用 SAP2000 软件分析不同沉降量下连廊钢桁架结构内力变化情况, 得到连廊上、下弦杆在地震作用下的最大弯矩和最大轴拉力。实验结果表明, 计算得到支座沉降后, 连廊上弦杆和腹杆内动力系数最大值分别为 0.17、0.15, 比传统的时程分析法更接近相关规定值 0.16, 结果准确。

关键词: 支座沉降; 大跨度; 钢结构连廊; 地震受力; 附加内力; 计算模型

中图分类号: TU211

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)02-0319-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.319

Influence of Support Settlement on the Seismic Behavior of Large-span Steel Structure Corridors

CUI Li¹, WU Haiying²

(1. Changzhi Vocational and Technical College, Changzhi 046000, Shanxi, China;

2. Shanxi University, Taiyuan 030013, Shanxi, China)

Abstract: The influence of support settlement on the seismic impact analysis of long-span steel structure corridors is often overlooked, but is very important. In this paper, such an influence was studied, and a stress model of the long-span steel structure in earthquakes was established. Incorporating settlement amount into the model, the additional internal force of the corridor (including steel frame and steel truss) under earthquake impact was calculated. The additional bending moment diagram of the corridor was then drawn using structural mechanics, and the seismic impact expression of the settlement on the steel frame of the connecting corridor was obtained. The internal force change of the steel truss structure connected with the corridor under different

收稿日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61603230)

第一作者简介: 崔 莉 (1979-), 女, 山西长治人, 讲师, 研究方向: 土木工程。E-mail: cui0410@163.com。

settlement levels was analyzed with SAP2000 software. The maximum bending moment and maximum axial tension of the upper and bottom chords on the corridor were then calculated under earthquake conditions. The experimental results showed that after support settlement, the maximum dynamic coefficients of the upper chord and web member were 0.17 and 0.15, respectively, which was closer to the relative code value (0.16) than the results achieved through the traditional time-history analysis method.

Keywords: support settlement; large span; steel structure corridor; seismic behavior; additional internal force; calculation model

0 引言

大跨度钢结构连廊一般是指两栋楼或多栋高楼间架空的连体结构,此种结构能够满足人们对建筑造型的使用需求^[1]。连廊跨度一般从几米到几十米不等,大跨度结构一般采用钢结构^[2]。连廊一方面要调整上端结构的形态突变,需要在荷载下抵抗内应力^[3],另一方面考虑连廊的跨度,还需承受地震、两侧结构支座沉降和温度的影响,所以大跨度钢结构连廊受力较为复杂^[4]。此外,连廊设计的重点是和两侧支座的结合,若处理不当会严重影响大跨度钢结构的安全性^[5]。其中,支座的不均匀沉降是一种常见的建筑工程安全事故,地震作用下、地基土的差异分布、地下空间开发或地下水位下沉都可能导致连廊支座沉降,造成周围土体位移,导致大跨度钢结构连廊变形和产生附加内力,改变了结构的固有动力特性,影响连廊结构的抗震性。研究支座沉降对大跨度钢结构连廊结构的受力性能,对结构抗震分析具有较强的实际意义。

为确保大跨度钢结构的稳定性,需利用有效方法削弱支座沉降程度^[6]。但在不可避免的地震作用下,支座沉降对钢结构连廊的受力性能带来干扰,因此对大跨度钢结构连廊地震受力性能分析尤为重要。以往相关研究中,文献[7]研究支座沉降与单层球面铝合金网壳结构性能的关联性时,未建立计算模型,对地震受力性能影响分析不全面。文献[8]对某大跨度悬挑钢连廊卸载进行多尺度有限元模拟及分析时,未考虑连廊钢框架附加内力,计算结果与实际不符。因此,提出新的支座沉降对大跨度钢结构连廊地震受力性能影响分析方法,为相关研究提供可靠数据。

1 支座沉降对大跨度钢结构连廊地震受力性能影响分析

1.1 某双塔连廊结构示意

为研究支座沉降与大跨度钢结构连廊地震受力

性能间的影响关系,以某双塔楼连廊实际结构为例,分析连廊结构^[9]。该双塔楼为 20 层,层高为 4 m,总高度 62 m。柱网 7 m,抗震设防烈度为 9 度,场地土类别为 II 类,设计地震区域为第 1 组^[10]。混凝土强度为 C35,连廊跨度 25 m,安置在塔楼第 10 层,双塔连廊结构立面图如图 1 所示,双塔连廊结构平面图如图 2 所示。

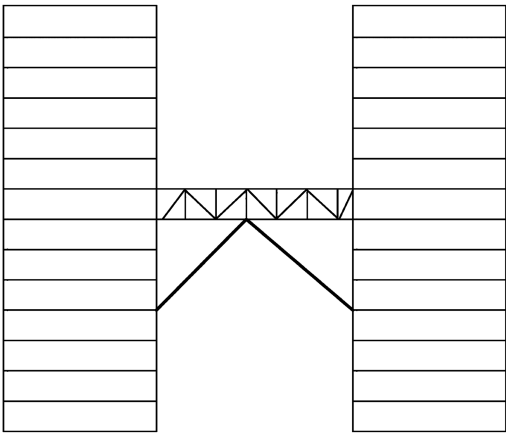


图 1 双塔连廊计算模型立面图

Fig.1 Elevation of the double-tower corridor structure

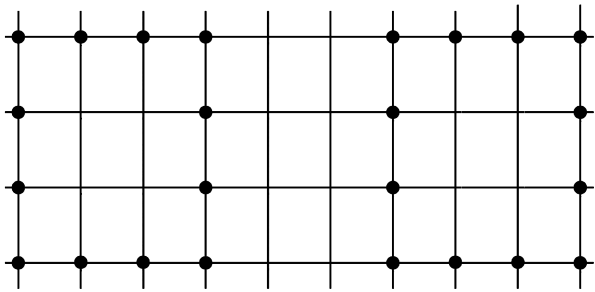


图 2 双塔连廊结构平面图

Fig.2 Plan of the double-tower corridor structure

1.2 支座沉降对大跨度钢结构地震受力模型设计

根据双塔连廊结构可知,当连廊侧面出现沉降,同时钢结构和主体结构属于硬连接时,支座沉降将导致连廊地震附加内力随之增大。连廊由钢框架和钢桁架构成^[11],研究支座沉降作用下连廊钢框架和

钢桁架的内力,能够反映出支座沉降对连廊地震受力性能的影响^[12]。

在连廊结构受到地震冲击作用下易发生支座沉降,此时整体大跨度钢结构受力性能发生变化,沉降过程中,连廊结构在地震中的受力模型为:

$$D = \frac{\delta_1}{\delta_2} + \chi \frac{jE}{q\delta_2} \quad (1)$$

式中: δ_1 和 δ_2 分别为连廊钢结构的最大变形和极限变形; q 为钢结构的屈服强度; E 为耗能因子,可反映地震引起的沉降过程中的损伤程度; j 为连廊钢框架杆最大负弯矩; χ 代表沉降量。

构建支座沉降引起连廊钢框架的地震附加弯矩图,如图 3 所示。利用图 3(a) 所示的连廊钢框架分

析,假设 D 点支座的沉降为 Δ ,根据结构力学方法^[13],可得支座沉降情况下连廊钢框架的地震附加弯矩图,如图 3(b) 所示。由该图可知连廊框架的地震附加内力表达式:

$$N_A = N_B = \frac{j_c}{j_c + j_b} N_0 \quad (2)$$

$$N_C = N_D = \frac{1}{2} \frac{j_c}{j_c + j_b} N_0 \quad (3)$$

$$N_0 = \frac{6j_b\Delta}{K} \quad (4)$$

式中: N_i 为连廊 i 处钢框架杆的地震附加内力; K 为连廊钢框架杆跨度。由图 3(b) 可知,支座沉降导致连廊结构地震附加内力增加^[14]。

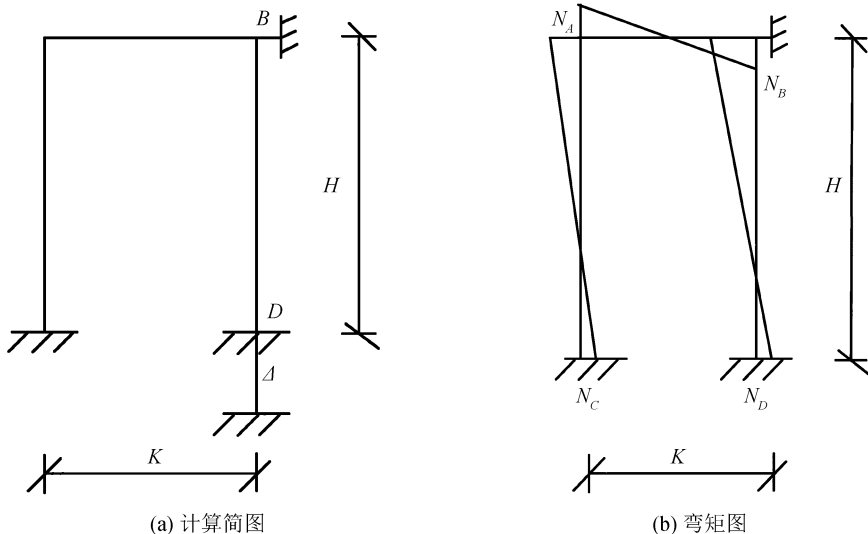


图 3 支座沉降引起连廊钢框架地震附加弯矩

Fig.3 Additional seismic bending moment of steel frame caused by bearing settlement

1.3 不同沉降量下模型的应用

在上节中分析了连廊框架的地震附加内力后,可确定沉降量对连廊结构在地震作用下的损伤程度。考虑地震冲击下连廊钢结构所产生的滞回耗能,确定不同沉降量下大跨度钢结构连廊框架的损伤模型为^[15]:

$$F = \chi \left(\frac{N_A}{N_C} + D \right) - \frac{\ln M}{\beta} \quad (5)$$

式中: M 为地震作用下钢结构框架的最大损伤系数; β 为结构需求参数。

以连廊框架的损伤作为加权系数,假设整体结构中,损伤越严重的结构点对大跨度钢结构连廊框架损伤的影响越大,不同沉降量对连廊钢框架地震冲击表达式为^[16]:

$$\lambda = \frac{\chi F_i}{\sum F_i} - P\sigma \quad (6)$$

式中: λ 为不同沉降量对连廊钢框架地震冲击能量加权因子; P 代表钢结构实际响应的随机变量; F_i 代表连廊钢结构不同受力点的损伤因子; σ 为地震动强度指标的随机变量。

2 实验分析

2.1 实验环境设计

依照规范要求,发生支座沉降时,结构不复杂的建筑平均沉降量是 200 mm,所以这里令两侧沉降差 $\Delta = 100$ mm。利用 SAP2000 软件分析连廊钢桁架结构当支座沉降 $\Delta = 100$ mm 时的结构在地震冲击下内力参数变化。图 4 为支座沉降情况下连廊钢桁架结构的弯矩、轴力图。

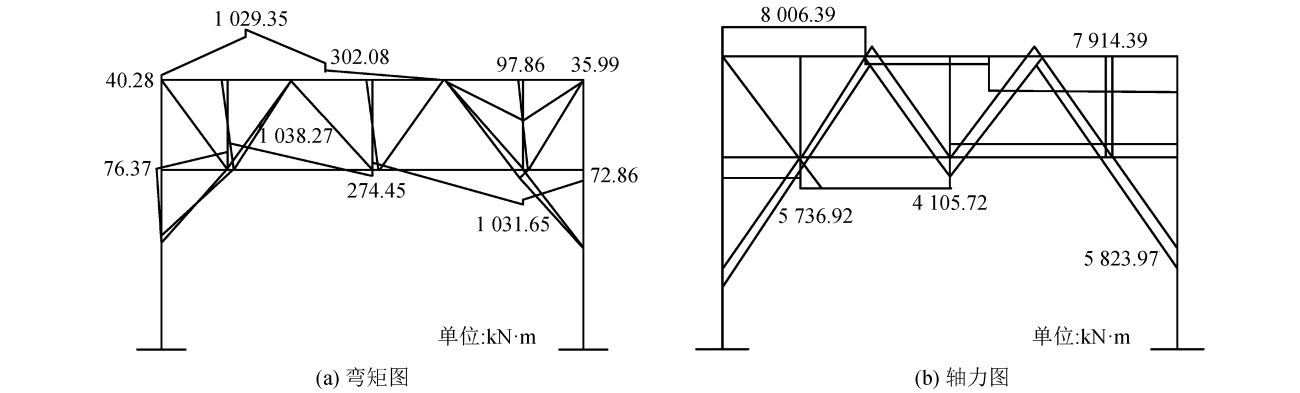


图 4 支座沉降作用下连廊钢桁架结构的地震内力
Fig.4 Seismic internal force of steel truss structure under bearing settlement

由图 4 可知,支座沉降发生时,连廊钢桁架腹杆主要为轴力,地震内力在连廊钢桁架第二节,上弦杆最大弯矩为 $N_{\text{max}}^{\text{上弦}}=1\,029.35\text{ kN}\cdot\text{m}$,最大轴拉力为 $N_{\text{max}}^{\text{上弦}}=8\,006.39\text{ kN}$;下弦杆最大弯矩为 $N_{\text{max}}^{\text{下弦}}=1\,038.27\text{ kN}\cdot\text{m}$,最大轴拉力为 $N_{\text{max}}^{\text{下弦}}=4\,105.72\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

2.2 竖向地震作用下竖向位移和竖向加速度参数变化情况分析

实验采用三种分析方法对大跨度钢结构连廊节点在竖向地震作用下,支座沉降引起的竖向位移和竖向加速度对比分析。三种分析方法分别为反应谱法、时程分析法和本文的方法。表 1 为三种分析方法的连廊节点竖向位移对比值,表 2 为三种分析方法的连廊节点竖向加速度对比值。给出 SAP2000 软件中,将实验环境真实的竖向位移和横向加速度值设为实际值。

由表 1 和表 2 可以看出,三种分析方法的连廊节点竖向位移值随着距跨中距离变远而增加,当距跨中距离为 -42.2 m 时,本文方法的连廊节点竖向位移为 0.568 m ,加速度为 $0.374\,25\text{ m/s}^2$,另外两种方法的竖向位移分别为 0.336 m 和 0.371 m ,加速度

表 1 三种分析方法的连廊节点竖向位移对比值

Table 1 Comparison between vertical displacements of corridor nodes with three analysis methods

距跨中的距离/m	反应谱法/m	时程分析法/m	本文方法/m	实际值/m
-42.2	0.336	0.371	0.568	0.558
-35.6	2.729	2.814	4.227	4.208
-29.8	5.034	5.336	8.146	8.097
-23.4	6.977	7.548	11.532	11.486
-17.3	8.552	9.412	14.371	14.327
-11.5	9.726	10.821	16.514	16.498
-5.7	10.443	11.6	17.853	17.765
0	10.685	12.005	18.324	17.986

表 2 三种分析方法的连廊节点竖向加速度对比值

Table 2 Comparison between vertical accelerations of corridor nodes with three analysis methods

距跨中的距离/m	本文方法/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	时程分析法/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	反应谱法/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	实际值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
-42.2	0.374 25	0.036 65	0.041 81	0.360 15
-35.6	0.286 51	0.276 79	0.310 52	0.276 52
-29.8	0.534 49	0.524 5	0.587 79	0.523 37
-23.4	0.762 83	0.742 63	0.831 25	0.751 06
-17.3	0.946 17	0.925 4	1.034 58	0.935 26
-11.5	1.093 45	1.063 45	1.187 02	1.082 65
-5.7	1.189 27	1.149 83	1.281 33	1.162 56
0	1.26	1.17	1.312 51	1.25

分别为 $0.036\,65\text{ m/s}^2$ 和 $0.041\,81\text{ m/s}^2$,本文方法获取的连廊节点竖向位移值更加接近软件中预先设定的实际值;本文方法的最大竖向位移值为 18.324 m ,另外两种方法的最大竖向位移值分别为 10.685 m 和 12.005 m ,本文方法获取的最大竖向位移值同实际值更加匹配,其计算结果较另外两种方法更准确,更符合实际给出的数据,说明本文方法能更真实反映出大跨度钢结构连廊在竖向地震影响下的变化情况,从而验证了本文方法的可靠性。

2.3 支座沉降作用下连廊杆件内力对比分析

图 5 和图 6 分别是利用上述三种分析方法在支座沉降作用下,对连廊上弦杆和腹杆的内动力系数分析对比图。此二图能够反映出支座沉降对大跨度钢结构连廊的地震受力性能影响。设定最大内动力系数为 0.16 (内动力系数=所受冲击力/理论承受冲击力)。跨度比反映支座的沉降程度(支座的沉降程度=沉降高度/实际高度)。要求沉降不能超过 50% 。

由图 5 和图 6 内动力系数的分布可以看出,不论弦杆的内动力系数还是不论弦杆的内动力系数还是腹杆的内动力系数,反应谱法的折线均处于最下方,且内动力系数值均接近 0.08 。时程分析法和本文方

法对杆件内动力系数的分布规律一致,即上弦杆内动力系数分布处于上升趋势,腹杆内动力系数分布先下降后上升,且上弦杆的数值要比腹杆的数值大。

本文方法的上弦杆和腹杆内动力系数最大值分别为 0.17、0.15,时程分析法的分别为 0.14、0.11,反应谱法的分别为 0.10、0.09。由于分析方法的不同,导致内动力系数的不同,而本文方法的最大系数均出现在跨中,即跨度比为 0.25 处,因此本文方法与另外两种方法相比,实际计算的内动力系数更接近规范中竖向地震内动力系数的相关规定 0.16,验证了本文方法的有效性。

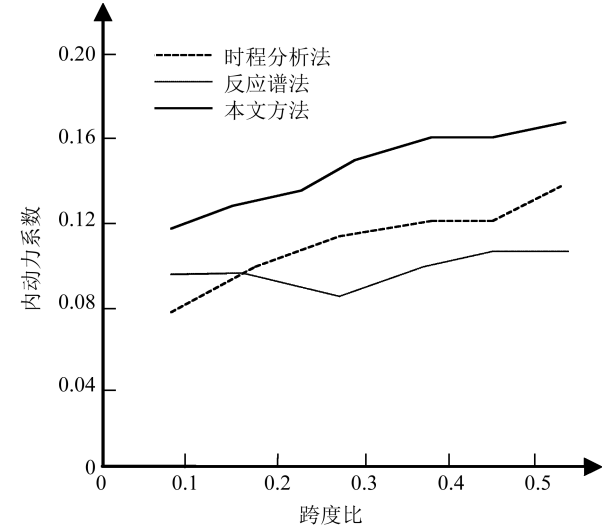


图 5 三种分析方法下上弦杆的内动力系数
Fig.5 Internal force coefficients of the upper chord with three analysis methods

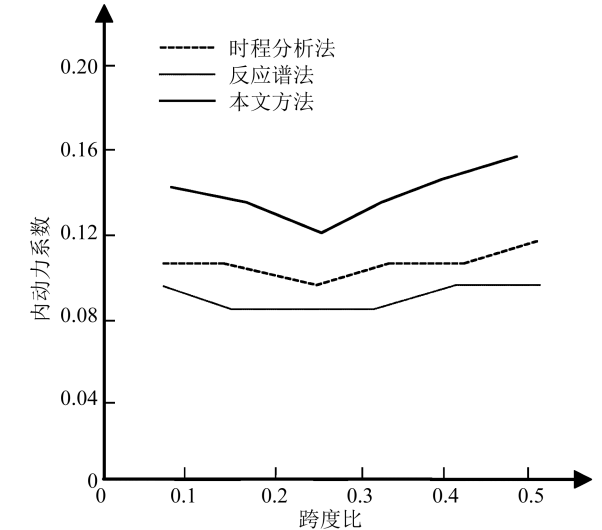


图 6 三种分析方法下腹杆的内动力系数
Fig.6 Internal force coefficients of the web member with three analysis methods

2.4 支座沉降作用下大跨度钢结构连廊轴力对比分析

在支座沉降作用下,将时程分析法与本文方法所得到的大跨度钢结构连廊轴力进行对比,如图 7 所示。

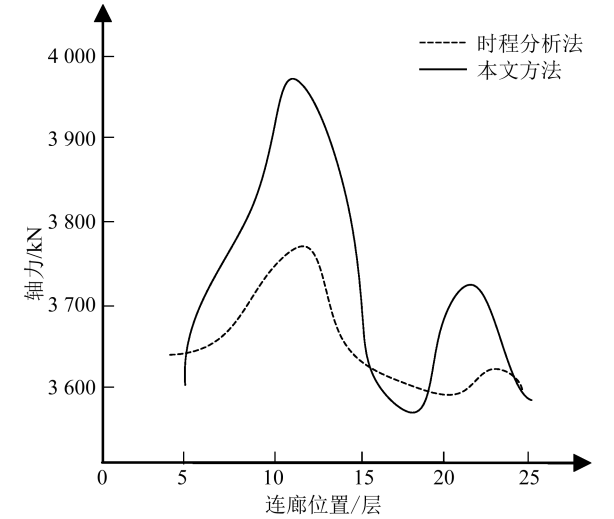


图 7 连廊轴力随连廊位置的变化情况
Fig.7 Change of the axial force along the corridor's position

两种方法都反映出:

- (1) 当连廊位于 11 层左右时,连廊的轴力达到最大。
- (2) 连廊位于 15~20 层时,连廊轴力骤减,达到接近最小值,而后又有所回升,连廊在 25 层左右时又开始下降。

两种方法又有不同之处:

- (1) 本文方法的轴力变化幅度较大,而时程分析法轴力变化的幅度相对略缓。
- (2) 由图 7 计算可知,时程分析法轴力变化的最大幅度为 8.03%,本文方法轴力变化的最大幅度为 14.4%。
- (3) 两种方法轴力相差最大之时,本文方法的轴力为时程分析法轴力的 1.07 倍。

经过以上对比可知,时程分析法和本文方法计算结果所反映出的轴力变化趋势基本一致,但本文方法的轴力随着连廊位置变化的幅度要比时程分析法的变化幅度大,说明本文方法能够最大限度地计算出连廊轴力的受力情况,因此能更细微地反映出支座沉降对大跨度钢结构连廊地震受力性能的影响。

2.5 支座沉降对结构抗震静力性能的影响分析

由于实际情况中支座沉降一般发生在多个相连支座中,因此假设沉降的支座有 A、B、C、D、E、F 6

个。根据规范要求,沉降量允许值为 25 mm,把 6 个相连支座的沉降量排列组合,得到状态如下:

- 状态 1:无支座沉降;
- 状态 2:C 与 D 支座沉降值是 10 mm,B 与 E 支座沉降值是 5 mm;
- 状态 3:C 与 D 支座沉降值是 15 mm,B 与 E 支座沉降值是 10 mm,A 与 F 支座沉降值是 5 mm;
- 状态 4:C 与 D 支座沉降值是 20 mm,B 与 E 支座沉降值是 15 mm,A 与 F 支座沉降值是 10 mm;
- 状态 5:C 与 D 支座沉降值是 25 mm,B 与 E 支座沉降值是 20 mm,A 与 F 支座沉降值是 15 mm。

对某大跨度钢结构连廊分别加以恒荷载、活荷载以及支座沉降荷载,利用本文方法实施静力运算。5 种状态下连廊的最大变形、最大轴力和最大应力用表 3 来描述。

表 3 各状态下连廊结构的最大变形和内力
Table 3 Maximum deformation and internal force of the corridor structure under different conditions

工况	最大变形/mm			最大轴力 /kN	最大应力 /MPa
	X 方向	Y 方向	Z 方向		
1	3.41	3.94	15.13	49.05	25.97
2	4.57	4.13	16.91	137.46	67.66
3	5.46	4.29	20.07	144.25	73.52
4	6.79	4.49	26.92	220.31	106.11
5	8.12	5.38	33.76	296.34	138.71

由表 3 可以看出,支座沉降对连廊的变形和内力作用较大。从变形状态可知,B 与 C 支座出现 5 mm 沉降时(状态 2),连廊变形程度发生显著变化,变形向支座沉降的方向偏移,当支座沉降量不断加大,连廊的变形程度随之增大,状态 5 的变形点从连廊上端转移到发生沉降的中间点。从连廊结构的受力情况可以知道,连廊轴力和应力最大处在沉降和未沉降的两支座中间,在状态 5 沉降情况下,杆件轴力峰值为 296.34 kN,应力峰值为 138.71 MPa,其数值是未沉降支座(状态 1)的 5 倍。

由以上分析可知,通过本文方法的计算,支座沉降对连廊的结构静力有明显作用,支座沉降使连廊结构变形并且内力产生显著变化,同时令连廊部分内力重分配。

3 结论

本文提出新的支座沉降对大跨度钢结构连廊地震受力性能影响分析方法,建立连廊结构受力模型,根据该模型分析支座沉降作用下大跨度钢结构连廊的钢框架附加内力和钢桁架结构内力,进而分析大

跨度钢结构连廊的地震受力性能。实验结果表明:

- (1) 连廊节点竖向位移值随着距跨中距离变远而增加。本文方法获取的最大竖向位移值同实际值更加匹配,更符合实际环境给出的数据,说明本文方法可真实反映大跨度钢结构连廊在竖向地震影响下的位移变化情况。
- (2) 本文方法计算得到连廊上弦杆和腹杆内动力系数最大值分别为 0.17、0.15,比时程分析法计算得到的上弦杆和腹杆内动力系数最大值 0.14、0.11 更接近规范中竖向地震内动力系数的相关规定值 0.16,验证了所提方法的有效性。
- (3) 本文方法的轴力随着连廊位置变化的幅度大,说明本文方法能够最大限度地计算出连廊轴力的受力情况,因此能更细微地反映出支座沉降对大跨度钢结构连廊地震受力性能的影响。
- (4) 综合分析实验数据发现,支座沉降对连廊的结构静力有明显作用,支座沉降使连廊结构变形并且内力产生显著变化,同时令连廊部分内力重分配。

鉴于论文篇幅所限,有关详细的技术环节在此恕不做详述,有待今后发表文章。作者水平有限,文中错误难免,望阅者给予指正。

参考文献(References)

[1] 江磊,王秀丽.某大跨拱形空间结构多维地震响应分析[J].空间结构,2014,20(1):18-22,39.
JIANG Lei,WANG Xiuli.Multi-Dimensional Seismic Responses of Large-Span Arch Spatial Structure[J].Spatial Structures,2014,20(1):18-22,39.

[2] 梁存之,潘从建,赵基达,等.大跨度钢结构整体提升关键问题分析[J].建筑科学,2014,30(11):9-15.
LIANG Cunzhi,PAN Congjian,ZHAO Jida,et al.Analysis of Key Problems about Integrated Lifting of Long-span Steel Structures[J].Building Science,2014,30(11):9-15.

[3] 孙连波.钢结构连廊安装施工方法及力学分析[J].施工技术,2015,44(11):26-28.
SUN Lianbo.Installation Method and Mechanical Analysis of Steel Gallery[J].Construction Technology,2015,44(11):26-28.

[4] 黄锐,Huang Rui.钢屋盖弹性支座对结构地震反应的影响研究[J].工程抗震与加固改造,2014,36(3):37-41,30.
HUANG Rui,HUANG Rui.Research on Earthquake Action of Building Structure with Elastic Bearing of Steel Roof[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2014,36(3):37-41,30.

[5] 单美弟,李强,Shan Meidi,等.曲线型钢桁架连廊人行振动与舒适度评价[J].科技通报,2016,32(1):167-174.
SHAN Meidi,LI Qiang,SHAN Meidi,et al.Pedestrian-Induced

- Vibration and Comfort Evaluation for a Curved Shape Steel Truss Skybridge[J].Bulletin of Science and Technology,2016,32(1):167-174.
- [6] 任志刚,李培鹏,王乾坤,等.复杂超高钢结构电视塔地震反应分析[J].工业建筑,2016,46(1):165-172,146.
REN Zhigang,LI Peipeng,WANG Qiankun,et al.Seismic Response Analysis of Complex Super High-Rise Steel Tv Tower[J].Industrial Construction,2016,46(1):165-172,146.
- [7] 高伟,刘淑良,杨洪征,等.支座沉降对单层球面铝合金网壳结构性能的影响[J].钢结构,2014,29(1):4-7.
GAO Wei,LIU Shuliang,YANG Hongzheng,et al.The Effect of Support Settlement on Construction Performance of Aluminum Alloy Spherical Reticulated Shell[J].Steel Construction,2014,29(1):4-7.
- [8] 杨伟,YANG Wei.某大跨度悬挑钢连廊卸载多尺度有限元模拟及分析[J].结构工程师,2017,33(5):194-200.
YANG Wei,YANG Wei.Multi-Scale Finite Element Simulation Analysis of a Large Span Cantilever Steel Gallery after Unloading[J].Structural Engineers,2017,33(5):194-200.
- [9] 郑山锁,田进,韩言召,等.考虑锈蚀的钢结构地震易损性分析[J].地震工程学报,2014,36(1):1-6.
ZHENG Shan-suo,TIAN Jin,HAN Yan-zhao,et al.Seismic Fragility Analysis of Steel Structure Considering Steel Corrosion[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(1):1-6.
- [10] 吴明权,马同庄,李生增,等.大吨位超长跨钢结构连廊整体液压提升施工[J].建筑技术,2016,47(3):242-244.
WU Mingquan,MA Tongzhuang,LI Shengzeng,et al.Integral Hydraulic Lifting Construction of Large-Tonnage Super-Wide Span Steel Structure Corridor[J].Architecture Technology,2016,47(3):242-244.
- [11] 聂祺,唐曹明,杨韬,等.某大跨度双塔连体高层结构抗震优化设计[J].四川建筑科学研究,2015,41(2):175-178,187.
NIE Qi,TANG Caoming,YANG Tao,et al.Seismic Optimization Design of a Twin-Tower Tall Building with Connective Structure[J].Sichuan Building Science,2015,41(2):175-178,187.
- [12] 薛启超,张井财,何建,等.地震作用下 PTMD 对高层钢结构的减振效果[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(3):412-418.
XUE Qichao,ZHANG Jingcai,HE Jian,et al.Reducing Vibration Performance of Pounding TMD on High-rise Steel Structures Subject to Seismic Effects[J].Journal of Harbin Engineering University,2017,38(3):412-418.
- [13] 张海东.远场地震下人字形中心支撑钢框架基于能量的性态设计方法[D].苏州:苏州科技大学,2016.
ZHANG Haidong.Energy-Based Seismic Design Method of Chevron Concentrically Braced Steel Frame under Far-Field Earthquake[D].Suzhou:Suzhou University of Science and Technology,2016.
- [14] 吴锁平,吕健,张大长,等.输电杆塔用 Q420 钢管轴压稳定性试验研究[J].江苏电机工程,2016,35(2):52-55.
WU Suoping,LÜ Jian,ZHANG Dachang,et al.Computational Theory and Comparison Analysis on Axial Compression Bearing Capacity of Q420 High Strength Steel Tube for Transmission Line Tower[J].Jiangsu Electrical Engineering,2016,35(2):52-55.
- [15] 余周武,王小威.水工隧洞衬砌结构非线性地震响应分析[J].水利水电技术,2018,49(6):54-59.
YU Zhouwu,WANG Xiaowei.Analysis on Non-linear Seismic Response of Lining Structure of Hydraulic Tunnel[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2018,49(6):54-59.
- [16] 李清,薛耀东,王永花,等.大底盘双塔结构层间隔震技术的抗震性能分析[J].科学技术与工程,2017,17(1):85-91,114.
LI Qing,XUE Yaodong,WANG Yonghua,et al.Seismic Performance Analysis of Large-span Double-tower Structural Layer Isolation Technology[J].Science Technology and Engineering,2017,17(1):85-91,114.