

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220501001

文章编号:1672-9331(2023)02-0137-09

引用格式:杨雪,王金龙,刘宇雄,等.基于多尺度模型大悬挑钢结构力学性能分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(2):137-145.

Citation: YANG Xue, WANG Jinlong, LIU Yuxiong, et al. Mechanical properties analysis of large cantilevered steel structures based on a multi-scale model[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(2): 137-145.

基于多尺度模型大悬挑钢结构力学性能分析

杨雪¹, 王金龙², 刘宇雄², 刘佳敏², 樊丽轩²

(1. 中国电建集团核电工程有限公司, 山东 济南 251200; 2. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:【目的】考察单尺度与多尺度模型对结构受力性能的影响。【方法】以太原南站屋盖大悬挑钢结构为研究对象, 针对其关键节点(68#相贯节点)进行静力足尺试验及理论分析, 提出“混凝土+横隔板”的细部构造措施, 并与原节点构造措施进行对比分析, 同时基于 midas Gen 软件建立结构整体单尺度模型及含关键节点的多尺度模型, 重点探讨结构的稳定性、动力响应等力学性能。【结果】相对于原节点构造措施, “C40混凝土+5道横隔板”细部构造措施的承载力满足要求且具有一定的经济性; 与单尺度模型相比, 多尺度模型结构的整体应力降低了9.70%; 多尺度模型结构中关键节点的受力与单独节点的受力之间差异明显, 其变形及应力分别降低了6.53%和25.73%。【结论】多尺度模型可以更真实地模拟结构的受力特性, 其结果更精确。

关键词:多尺度模型; 大悬挑; 相贯节点; 细部构造措施; 力学性能

中图分类号: TU392.3

文献标志码: A

0 引言

悬挑结构常用于建筑中的挑檐、阳台、体育场看台顶棚等。悬挑结构的悬挑部分为无多余约束的静定结构, 在竖向力及竖向地震作用下, 悬挑部分根部节点处受力复杂且内力较大, 容易发生整体倾覆及倒塌, 此外悬挑结构具有整体稳定性差的特点。

当前不少专家对悬挑结构的力学性能开展了相应的研究工作^[1-3], 然而对悬挑结构的受力性能多采用单尺度模型进行分析, 该方法难以真实反映关键部位构件的受力情况。多尺度模型最初由 HOU 等^[4]提出, 其思路为: 通过构建基函数将宏观单元与微观单元联系起来, 并只需在宏观单元上处理信息就能得到所需结果。多尺度模型随后被国内研究人员引用并逐渐成为一种流行趋势。对于建筑结构, 需要根据结构的复杂程度以及所求问题, 选择合适单元类型、合理的连接方式, 使不

同尺度模型之间实现协同计算, 从而可以更快、更准确地把握结构的受力性能。陆新征等^[5]通过多尺度模型实现了微观与宏观模型间的变形协调, 并通过案例验证了界面连接的有效性。王栋辉^[6]介绍了多尺度方法的连接原理, 通过梁单元模型、实体单元模型、多尺度模型的对比分析, 验证了多尺度模型的有效性, 并基于多尺度模型研究了空间钢框架支撑体系的受力性能。石永久等^[7]、梁晶辉^[8]、姜明龙等^[9]基于多尺度模型研究了不同结构形式的静力稳定性能, 指出多尺度模型可以更真实地模拟节点的边界条件以及节点在整体结构中的受力性能。刘朝^[10]基于多尺度模型对方支管-H型钢T形相贯节点的屈曲特征进行了研究, 并与单一相贯节点的特征进行对比, 结果表明: 相贯节点在整体结构中表现出更多的变形特征。基于多尺度模型的优越性, 张一楠^[11]、陈凯骏^[12]采用 ANSYS 软件建立了特高压钢管塔多尺度模型, 分析了关键受力位置 KK 形相贯节点的破坏模式。张瑾等^[13]以上海某悬挑结构大楼为研究对象, 对

收稿日期: 2022-05-01; 修回日期: 2022-05-26; 接受日期: 2022-06-12

基金项目: 山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(DC190000602)

通信作者: 刘宇雄(1998—)(ORCID: 0000-0003-3008-4690), 男, 硕士研究生, 主要从事钢结构与空间结构方面的研究。E-mail: 1084102925@qq.com

结构悬挑部分的舒适度进行了分析与评价,并对节点的受力进行了补充分析。尹雄等^[14]建立了某体育场看台大悬挑结构的多尺度模型,并对关键部位的相贯节点进行了有限元分析,肯定了多尺度方法的有效性。杨伟^[15]基于midas Gen软件建立了某悬挑钢连廊单尺度与多尺度模型,进一步说明了多尺度方法的优越性,并基于多尺度模型分析了牛腿节点的应力分布规律。

为考察悬挑结构的受力特点及多尺度模型的优越性,本研究以太原南站屋盖大悬挑钢结构为研究对象,基于静力足尺试验与有限元软件分析其68#相贯节点的承载性能,同时提出“混凝土+横隔板”的细部构造措施;通过midas Gen软件对该相贯节点进行细化,建立结构多尺度模型,分析结构的稳定性、动力响应等受力特性。

1 结构关键节点试验研究及理论分析

1.1 静力足尺试验

根据钢结构的特殊性与实际工程需要,本研究选取太原南站屋盖大悬挑钢结构关键节点——68#相贯节点进行静力足尺试验。方钢管和圆钢管的钢材分别采用Q345C和Q235C。68#相贯节点试件如图1所示。在主管节点域内设置“井”字形加劲肋+5道横隔板”以提高杆件交汇处主管管壁的刚度,68#相贯节点的细部构造如图2所示。

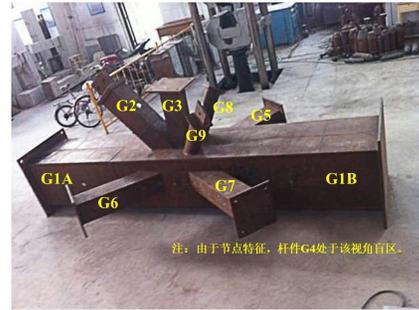


图1 68#相贯节点试件

Fig. 1 68# tubular joint specimen

在本次试验中,在每个圆钢管杆件的跨中位置沿圆周对称布置两个单向应变片,在每个方钢管两个相对的侧面各布置一个单向应变片;考虑到应力集中现象,在节点相贯区域贴近焊缝处布置三向应变片。测点位置如图3所示(图中S表示单向应变片,T表示三向应变花,G表示杆件)。

在设计荷载下,主管上各测点中T21的等效

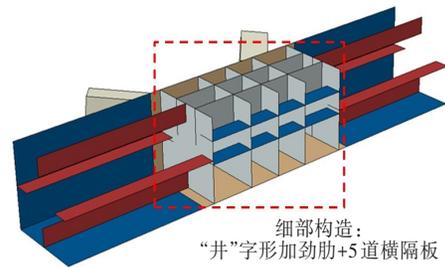


图2 68#相贯节点细部构造

Fig. 2 Detail construction of 68# tubular joint

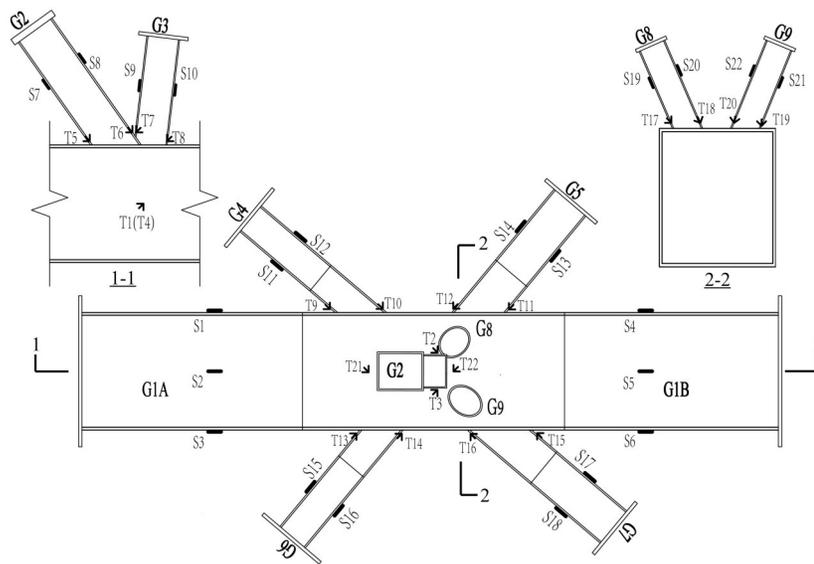


图3 测点布置示意图

Fig. 3 The layout of measuring points

应力最大,为154.1 MPa,因此主管应力未达到屈服强度,其变形仍处于弹性阶段。另外,当加载至0.60倍的设计荷载时,支管G8上测点T18的应力首先达到屈服强度,主管管壁上测点T1的应力在加载至1.15倍设计荷载时达到屈服强度,支管G9上测点T20的应力在加载至1.30倍设计荷载时达到屈服强度。在加载过程中,其余测点均保持弹性,但就整体而言节点域内杆件并没有明显的宏观塑性变形,表明还可以继续对节点加载。

1.2 有限元分析

1.2.1 有限元模型的验证

本节基于ABAQUS有限元软件建立了精细化相贯节点模型。模型所选单元为四节点壳单元S4R(采用减缩积分);材料的本构关系采用理想的三折线弹塑性模型,弹性模量 E 为 2.06×10^5 MPa,泊松比 μ 为0.3;矩形、圆截面杆件的屈服强度分别

为345、235 MPa;主管G1A端有 y 向约束,G1B端固定,其余杆件按自由端考虑,节点模型见图4^[16]。

因受压杆件G3的应力较其他杆件的先达到屈服强度,故以矩形截面的支管G3为控制杆件来验证有限元模型的有效性,得到应变理论值与试验值对比结果,如图5所示(图中S为单向应变片,9、10为测点编号)。从图5可以看出,该杆件测点应变理论值与试验值的变化趋势基本一致,杆件平均应变的差值率小于15%,表明该有限元模型是有效的、可靠的。68#相贯节点荷载-变形曲线如图6所示,其极限承载力 F_u 为2 271.51 kN(图中 D 为主管宽度, δ 为主管表面相贯线处的变形)。

1.2.2 细部构造对节点承载性能的影响分析

考虑到钢-混凝土组合结构具有稳定性高、施工方便等优点,本研究将相贯节点细部构造措施设置为“C40混凝土+5道横隔板”,以分析细部构

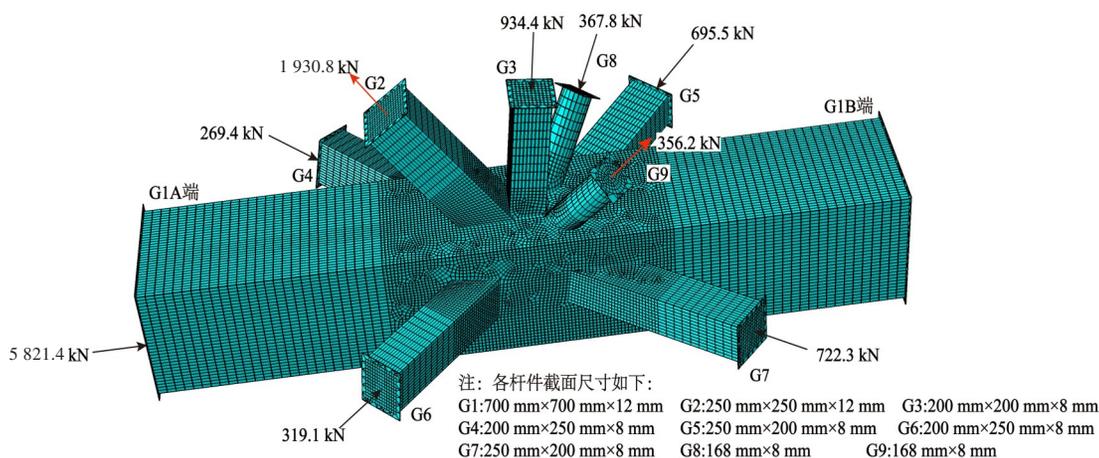


图4 68#相贯节点有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the 68# tubular joint

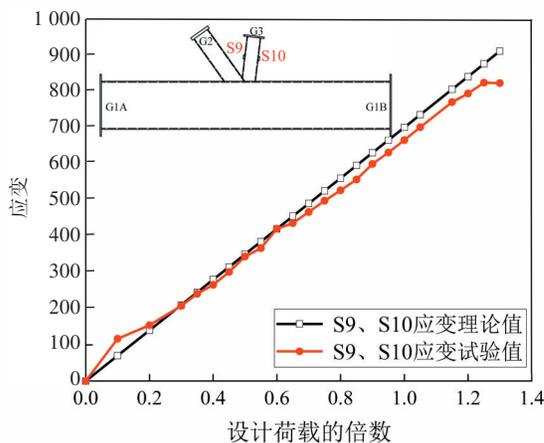


图5 支管G3应变试验值与理论值对比

Fig. 5 Strain comparison between G3 test and theoretical value

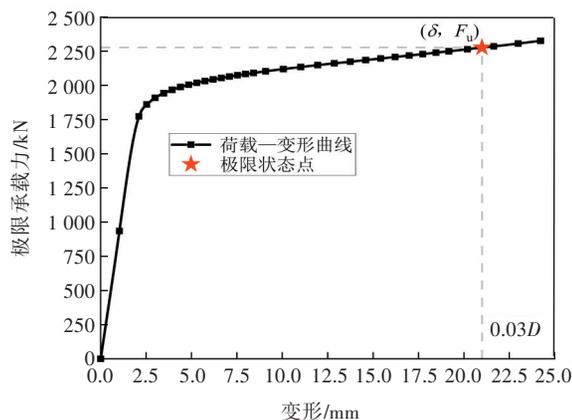


图6 68#相贯节点荷载-变形曲线

Fig. 6 Load-deformation curve of 68# tubular joint

造措施对相贯节点承载性能的影响。

图7~8分别为由有限元软件分析得到的68#相贯节点和“C40混凝土+5道横隔板”相贯节点的应力云图。由图7~8可知,与68#相贯节点相比,当节点细部构造为“C40混凝土+5道横隔板”时,节点域的刚度增大,从而有效抑制了主管管壁的塑性变形,同时也使主管的塑性区变小。混凝土的弹性模量与泊松比均比钢管的小,当轴心受压支管的应力较小时,钢管与混凝土均处于单向受压状态,压应力由二者共同承担;当节点所受压应力增大时,混凝土的泊松比随之增大,而钢管的泊松比不变,这导致钢管的横向变形比混凝土的小。此外,钢管受到了来自混凝土的侧向压力,钢管对内填混凝土的约束作用使其在轴力作用下处于三向压缩应力状态。钢管-混凝土的组合构造能充分发挥这两种材料的优点,从而使其具有良好的力学性能。

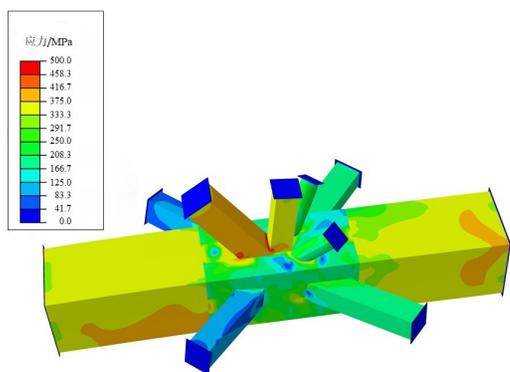


图7 68#相贯节点应力云图

Fig. 7 The stress contour of 68# tubular joint

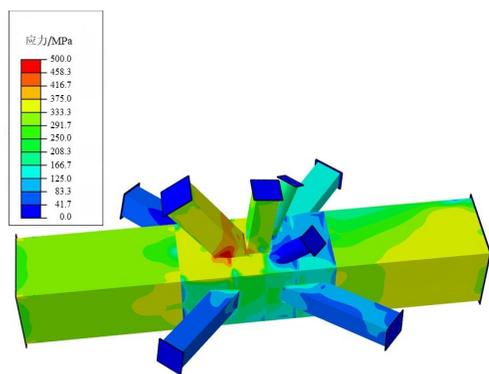


图8 “C40混凝土+5道横隔板”相贯节点应力云图

Fig. 8 The stress contour of "C40 concrete +5 transverse diaphragm" tubular joint

“C40混凝土+5道横隔板”相贯节点的极限承载力为1 922.20 kN,是设计荷载的2.06倍,满足要求且有足够的安全储备。从施工便捷性角度考

虑,与原节点构造措施相比,“C40混凝土+5道横隔板”构造措施减少了约20 m长的焊缝,从而加快了结构的施工进度;从经济性角度考虑,“井”字形加劲肋+5道横隔板”相贯节点的“井”字形加劲肋”钢板的质量约为365 kg,以5 000元/t计价,成本约为1 825元;而“C40混凝土+5道横隔板”相贯节点内部填充了约0.7 m³混凝土,以500元/m³计价,成本约为350元,与前者相比降低了81%。因此,该相贯节点可以采用“C40混凝土+5道横隔板”构造措施以提高其极限承载性能。

2 多尺度结构整体有限元分析

2.1 多尺度模型的建立

本研究采用midas Gen软件建立太原南站屋盖大悬挑钢结构单尺度模型,其杆件及“十”字形钢柱均采用梁单元模拟,连接方式为刚性连接,钢柱下端固结。将梁单元相贯节点分割提取,并导入有限元分析软件中生成板单元相贯节点模型;采用“布尔运算-并集”将各支管、加劲肋与主管合并成整体以保证各节点相互耦合,并基于前文研究成果建立“C40混凝土+5道横隔板”细部构造措施模型,其中混凝土为实体单元,加劲肋为板单元;采用自动划分方式对整个节点进行网格划分,网格尺寸为250 mm×250 mm;通过多点约束法将板单元与梁单元进行刚性连接,通过界面节点位移实现不同维度单元间的连接。大悬挑钢结构多尺度模型如图9所示。

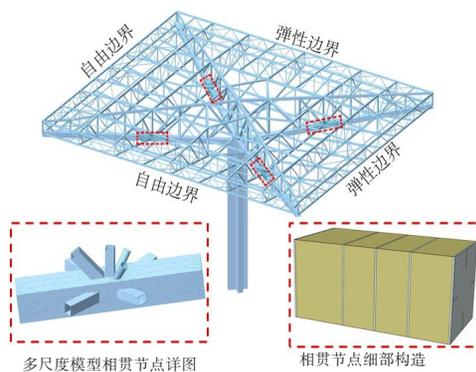


图9 大悬挑钢结构多尺度模型

Fig. 9 Multi-scale model of the large-cantilever steel structure

太原南站位于山西省太原市,其屋盖大悬挑钢结构的恒荷载为由软件计算的构件自重+屋面恒荷载0.40 kN/m²,活荷载为0.50 kN/m²,基本风压

力为 0.45 kN/m²,升温、降温的幅度均为 30 ℃(温度作用),抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值为 0.2g,设计地震分组为第一组,场地类别为 III 类,场地特征周期为 0.45 s,阻尼比为 0.02。

2.2 稳定性分析

分析大悬挑钢结构的稳定性是结构设计的一项重要工作。本研究采用 midas Gen 软件对大悬挑钢结构进行稳定性分析,选取 1.0 恒荷载+1.0 活荷载作为屈曲荷载组合。考虑到该结构复杂,且为了较全面地分析该结构整体及局部失稳情况,选取 100 阶屈曲模态进行分析,得到并提取前 10 阶屈曲模态所对应的结构特征值系数,结果如图 10 所示。图 11 所示为结构第 1 阶屈曲模态。

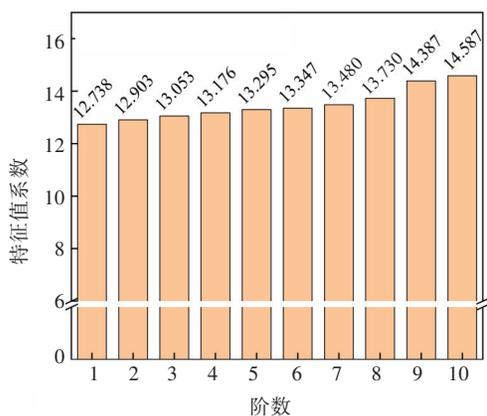


图 10 结构前 10 阶结构特征值系数

Fig. 10 Top 10 eigenvalue coefficients of the structure

表 1 结构前 6 阶模态特征值及振型参与质量系数

Table 1 Top 6 mode eigenvalues and mode participation mass coefficients of the structure

模态	周期/s	振型描述	振型参与质量系数/%					
			x 向平动	y 向平动	z 向平动	绕 x 轴转动	绕 y 轴转动	绕 z 轴转动
1	1.183 8	绕 z 轴转动	0.018 8	0.604 3	0.000 0	0.004 9	0.000 3	97.620 8
2	1.135 2	y 向平动	3.950 1	94.231 5	0.001 0	0.849 9	0.020 2	0.612 4
3	1.021 2	x 向平动	94.664 1	3.972 4	0.000 1	0.029 7	0.390 6	0.000 3
4	0.855 3	绕 y 轴转动	0.388 4	0.548 9	0.000 0	0.090 0	0.047 2	0.793 5
5	0.511 8	绕 x 轴转动	0.548 9	0.388 4	0.000 0	0.063 7	0.066 6	0.000 0
6	0.401 9	绕 x 轴转动	0.008 2	0.002 6	0.817 2	0.034 0	0.051 0	0.001 9

结构的第 1 阶自振频率为 0.844 7 Hz,自振周期为 1.183 8 s,主振型模态为绕 z 轴转动,第 2、3 阶振型分别为 y、x 向平动,周期比为 $T_3/T_1 = 1.021 2 s/1.183 8 s = 0.863 < 0.9$,说明自振周期较为接近,结构刚度适中;第 2 阶振型在 y 向平动参与质量系数最大,第 3 阶振型在 x 向平动参与质量系数最大,说明结构的低阶振型不容忽视。

结构 x、y 向平动振型参与质量系数累加至前 4

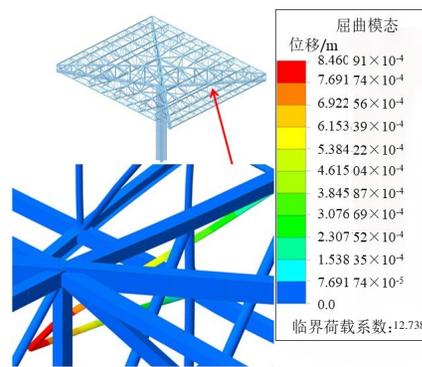


图 11 结构第 1 阶屈曲模态

Fig. 11 First-order buckling mode of the structure

由图 10 可知,大悬挑钢结构的第 1 阶屈曲特征值系数为 12.738,即第 1 阶模态的临界荷载系数为 12.738,所提取的前 100 阶屈曲模态特征值系数均较大且接近,满足文献[17]中的要求。由图 11 可知,该结构主要表现为钢桁架腹杆平面外失稳,且为局部失稳,由此可以直观地看出该结构的整体稳定性较好。

2.3 动力响应分析

2.3.1 结构自振特性分析

结构的自振特性是分析结构抗震性能的关键指标。本研究基于 midas Gen 软件建立了大悬挑钢结构多尺度模型,采用 Lanczos 方法对该结构模型的前 100 阶模态进行分析,以保证各方向的振型参与质量系数超过 90%。前 6 阶模态特征值及振型参与质量系数见表 1。

阶振型时超过了 90%,低阶振型主要影响大悬挑钢结构的横向、纵向水平运动;同时,该大悬挑钢结构多尺度模型节点较多,自振频率较集中,部分相邻振型的频率较为接近,且有些振型包含两种振型,具有耦合性,由此反映出该类大悬挑钢结构的动力特性具有复杂性;结构的质量中心与刚度中心接近,几何结构对称,自振周期相近,表明结构刚度较均匀,无明显刚度较弱部分。

2.3.2 结构地震响应分析

本研究分别采用振型分解反应谱法和弹性时程分析法分析结构在多遇地震作用下的地震响应,限于篇幅仅详细介绍弹性时程分析法的计算结果,计算时将地震的作用取为结构恒荷载标准值与活荷载组合值之和,即1.0恒荷载+0.5活荷载。

文献[18]中第5.1.2条规定:采用时程分析法时天然地震波数量不应小于地震波总数的2/3。本研究选取1940年人类记录的第一条地震波EI Centro、1952年美国记录的Taft地震波以及人工地震波进行时程分析。鉴于时程分析法中所采用的天然地震波及人工地震波与规范所要求的地震波存在一定差异,故需对地震波进行放缩调整^[19],根据规范将地震波加速度的峰值调整为 0.7 m/s^2 。

表2列出了在两条天然地震波与一条人工地震波作用下结构的基底反力的计算结果。分析表2可知,该结果符合文献[18]中的规定,说明所选地震波满足要求,可用于结构弹性动力的时程分析。结构在EI Centro地震波作用下, x 、 y 、 z 向位移最大值分别为21.90、6.35和5.70 mm;在Taft地震波作用下, x 、 y 、 z 向位移最大值分别为24.43、5.81和5.55 mm;在人工地震波作用下, x 、 y 、 z 向位移最大值分别为12.76、3.42和4.30 mm,最大位移均发生在屋盖结构悬挑区自由端,且产生的位移均满足文献[18]中的规定。

表2 基底反力的时程分析结果

Table 2 Time history analysis results of substrate reaction force

地震波	方向	基底反力/kN	基底反力与反应谱的比值/%
EI Centro	x	3 008.59	101.66
	y	2 490.80	86.57
	z	2 651.30	127.12
Taft	x	3 161.48	106.82
	y	2 289.91	79.59
	z	2 382.34	114.23
人工	x	2 630.19	88.87
	y	2 201.95	76.53
	z	2 359.52	113.13
平均值	x	2 933.42	99.12
	y	2 327.55	80.90
	z	2 464.39	118.16

2.4 计算结果对比

2.4.1 结构整体分析

对于太原南站屋盖大悬挑钢结构,其梁单元模型的计算时长为85.96 s;大悬挑钢结构多尺度模型节点及杆件数量较多,计算时长为933.28 s,约为梁单元模型计算时长的10.9倍,但仍在可接受的设计范围内。

本研究基于多尺度模型分析结构在28种不同荷载组合效应下的整体变形及应力,并将结构在最不利荷载工况下的结果与纯梁单元模型的计算结果进行对比。结果表明:不同尺度结构模型的变形特点基本保持一致,结构整体变形的最大值发生在悬挑部分两条上弦自由边相交处。结构多尺度模型整体变形最大值为66.72 mm,单尺度模型整体变形最大值为71.26 mm,经计算对比,多尺度模型整体变形比单尺度模型的小6.37%,此差异可认为是由节点的局部变形导致的。

单尺度模型整体应力的最大值为365.30 MPa,多尺度模型整体应力的最大值为329.87 MPa,比单尺度模型的小9.70%。这是因为:对由梁单元建立的大悬挑钢结构的相贯节点和其余杆件的节点采用了统一形式,未进行区分处理,且各杆件之间采用了较为粗糙的连接形式,忽略了节点的局部变形,这使得计算结果精度降低;同时,在结构失稳时,节点形状以及结构的应力分布发生了改变,且梁单元模型杆件的连接形式为刚接,没考虑杆件变形,而多尺度模型中相贯节点杆件交汇处产生的变形可分担结构部分变形及应力,从而减小了杆件的受力。

2.4.2 结构相贯节点分析

“C40混凝土+5道横隔板”相贯节点分析结果如图12所示。由图12(a)可知,由ABAQUS软件计算所得的相贯节点主管两端的应力大于其节点域上的应力,其原因为:在节点域内设置了“C40混凝土+5道横隔板”,提高了主管节点域的承载性能;矩形截面支管G2、G3的应力大于其余支管的应力,且支管G2、G3与主管相交处出现了应力集中现象。由图12(b)可知, midas Gen软件与ABAQUS软件计算所得的相贯节点的应力分布规律基本一致,即主管应力由节点域向主管两端逐渐增大,支管G2、G3的平均应力比其余支管的大,

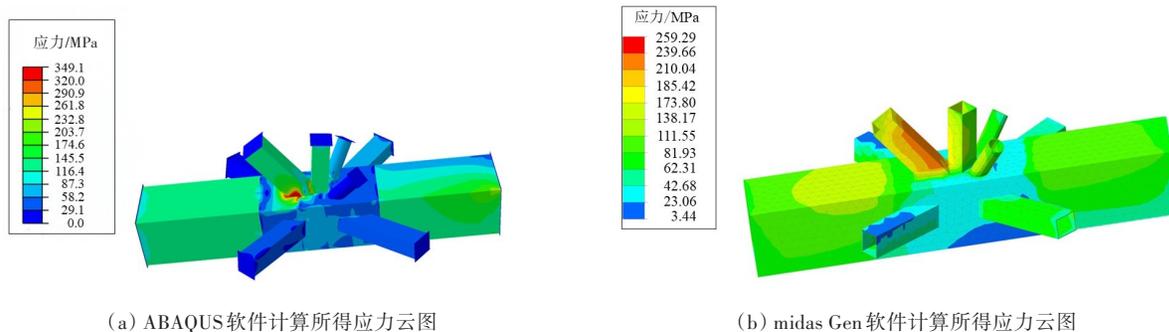


图12 “C40混凝土+5道横隔板”相贯节点分析结果

Fig. 12 "C40 concrete + 5 transverse diaphragm" joint analysis results

应力最大值为 259.29 MPa, 与 ABAQUS 软件分析所得的应力最大值相比, 减小了 25.73%。然而 ABAQUS 软件分析结果中的应力最大值位于支管 G2 与主管相交处, midas Gen 软件分析结果中的应力最大值位于支管 G2 中部。

在细部构造为“C40 混凝土+5 道横隔板”时, ABAQUS 软件计算得到的相贯节点的变形最大值为 12.55 mm, midas Gen 软件计算得到的变形最大值为 11.73 mm, 比 ABAQUS 软件计算得到的小 6.53%。

综上所述, 在 midas Gen 软件多尺度模型中相贯节点各支管端与梁单元之间是刚性连接的, 而在 ABAQUS 软件中各支管是按自由端考虑的, 所以 midas Gen 软件较为真实地模拟了节点刚度以及边界条件等因素, 而边界条件亦是影响相贯节点极限承载力的重要因素^[20-21]。采用 ABAQUS 软件建立的相贯节点模型不能反映不同荷载工况下的结果, 边界条件也与实际情况不符, 同时忽略了结构整体变形对节点变形的影响。因此, 本研究建议采用多尺度模型模拟实际边界条件, 并计算分析不同荷载组合下结构的受力性能。

3 结论

本研究以太原南站屋盖大悬挑钢结构为研究对象, 通过静力足尺试验与有限元手段分析其 68# 相贯节点的承载性能, 提出“混凝土+横隔板”的细部构造措施; 同时基于 midas Gen 软件对结构关键部位的相贯节点进行细化从而形成多尺度模型, 并基于此模型分析结构的受力性能, 主要得到以下结论:

1) “混凝土+横隔板”组合构造措施的承载性能及安全性满足相关要求, 同时该措施具有一定

的经济性及施工方便性; 大悬挑钢结构采用相贯节点连接时, 可采用“C40 混凝土+5 道横隔板”细部构造措施以提高相贯节点的承载性能。

2) 相较于纯梁单元的单尺度模型, 将关键节点进行细化的多尺度模型的结构整体应力与变形均有所降低, 而应力降低得最为显著, 降低了 9.70%。

3) 多尺度模型结构中关键节点的受力与单独节点的受力之间差异明显, 多尺度模型结构中关键节点的变形及应力分别降低了 6.53% 和 25.73%; 多尺度模型可以更真实地模拟相贯节点的边界条件, 考察节点的应力分布及变形特点, 同时可以避免单独分析相贯节点时荷载工况单一的弊端。

[参考文献]

- [1] 王秀丽, 王康, 张孝斌, 等. 考虑施工误差的大开孔悬挑网壳结构稳定性[J]. 空间结构, 2021, 27(4): 21-27. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.04.021.
WANG Xiuli, WANG Kang, ZHANG Xiaobin, et al. Stability of large opening cantilever reticulated shell considering construction error[J]. Spatial Structures, 2021, 27(4): 21-27. DOI: 10.13849/j. issn. 1006-6578. 2021.04.021.
- [2] 王田友, 潘斯勇, 黄银春, 等. 嘉兴市文化艺术中心悬挑开合屋盖结构设计[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 314-320.
WANG Tianyou, PAN Siyong, HUANG Yinchun, et al. Structural design of the cantilevered retractable roof of Jiaxing culture and art centre[J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 314-320.
- [3] 王玮, 付求. 上海某室外足球场带大悬挑顶棚钢结构观众席设计[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 321-325.
WANG Wei, FU Qiu. Design of a steel structure

- auditorium with a large cantilevered ceiling for an outdoor football field in Shanghai[J]. *Building Structure*, 2021, 51(S2):321-325.
- [4] HOU T Y, WU X H. A multiscale finite element method for elliptic problems in composite materials and porous media[J]. *Journal of Computational Physics*, 1997, 134(1): 169-189. DOI:10.1006/jcph.1997.5682.
- [5] 陆新征, 林旭川, 叶列平. 多尺度有限元建模方法及其应用[J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2008, 25(4): 76-80.
LU Xinzheng, LIN Xuchuan, YE Lieping. Multiscale finite element modeling and its application in structural analysis[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2008, 25(4): 76-80.
- [6] 王栋辉. 基于多尺度方法的空间钢框架支撑体系性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020. DOI:10.27029/d.cnki.ggdgu.2020.000380.
WANG Donghui. Research on performance of space steel frame brace system based on multi-scale method [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020. DOI:10.27029/d.cnki.ggdgu.2020.000380.
- [7] 石永久, 王萌, 王元清. 基于多尺度模型的钢框架抗震性能分析[J]. *工程力学*, 2011, 28(12):20-26.
SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing. Seismic behavior analysis of steel frame by multi-scale calculation method[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(12):20-26.
- [8] 梁晶辉. 管桁架结构静力性能的精细化有限元分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
LIANG Jinghui. Finite element refinement analysis of the static performance of tubular truss structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [9] 姜明龙, 朱南海, 陈大龙. 基于多尺度模型的单层球面网壳结构静力稳定性分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(11):4472-4477.
JIANG Minglong, ZHU Nanhai, CHEN Dalong. Static stability of single-layer spherical reticulated shell structure based on multi-scale model[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(11):4472-4477.
- [10] 刘朝. 方支管-H型钢弦杆T形节点受力性能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
LIU Zhao. Research on behavior of square hollow section brace-H-shaped chord T joints[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.
- [11] 张一楠. 基于多尺度分析的特高压钢管塔抗风设计研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.
ZHANG Yinan. Research on wind resistance design of extra-high voltage steel tubular tower based on multiscale analysis[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2019.
- [12] 陈凯骏. 基于多尺度分析模型高压输电铁塔受力特性的分析[D]. 南京: 南京工业大学, 2015.
CHEN Kaijun. Analysis of mechanical characteristic on high voltage transmission tower based on multi-scale model[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2015.
- [13] 张谨, 谈丽华, 路江龙, 等. 博世中国研发总部大楼结构分析[J]. *建筑结构*, 2013, 43(14): 29-33, 43. DOI: 10.19701/j.jzjg.2013.14.006.
ZHANG Jin, TAN Lihua, LU Jianglong, et al. Structure analysis on Bosch China R & D Headquarters building [J]. *Building Structure*, 2013, 43(14): 29-33, 43. DOI: 10.19701/j.jzjg.2013.14.006.
- [14] 尹雄, 俞锋. 贵州湄潭体育场罩棚结构设计与分析[J]. *建筑结构*, 2017, 47(11): 91-95. DOI: 10.19701/j.jzjg.2017.11.016.
YIN Xiong, YU Feng. Structural design and analysis on Guizhou Meitan Grandstand Roof[J]. *Building Structure*, 2017, 47(11):91-95. DOI:10.19701/j.jzjg.2017.11.016.
- [15] 杨伟. 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. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2017.05.027.
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. DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2017.05.027.
- [16] 刘宇雄, 范建军, 刘展翔, 等. 细部构造措施对复杂相贯节点静力性能影响的有限元分析[J]. *太原理工大学学报*, 2022, 53(1): 149-155. DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2022.01.016.
LIU Yuxiong, FAN Jianjun, LIU Zhanxiang, et al. Finite element analysis of the influen of detailed structural measures on static performance of complex tubular joints[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2022, 53(1): 149-155. DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2022.01.016.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for space frame structures: JGJ 7—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [19] 梁晓婕. 模块化装配式钢框架结构动力特性分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.

- LIANG Xiaojie. Analysis of dynamic characteristics of modular fabricated steel frame structure[D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University,2021.
- [20] 陈伏彬,范翔,张轩浪,等.角钢塔典型节点受力性能有限元分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022, 19(1): 45-52. DOI: 10.19951/j. cnki. 1672-9331.2022. 01.006.
- CHEN Fubin, FAN Xiang, ZHANG Xuanlang, et al. Mechanical performance of typical joints of angle steel tower based on finite element analysis[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 45-52. DOI: 10.19951/j. cnki. 1672-9331.2022.01.006.
- [21] 叶李斌.基于长期健康监测的大跨空间结构使用阶段的状态分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(1): 86-94. DOI: 10.19951/j. cnki. 1672-9331. 20220427010.
- YE Libin.State analysis of long-span space structure in service stage based on long-term health monitoring[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(1): 86-94. DOI: 10.19951/j. cnki.1672-9331.20220427010.

Mechanical properties analysis of large cantilevered steel structures based on a multi-scale model

YANG Xue¹, WANG Jinlong², LIU Yuxiong², LIU Jiamin², FAN Lixuan²

(1.Power China Nuclear Engineering Co., Ltd., Jinan 251200,China;

2.College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024,China)

Abstract: [Purposes] This study aims to investigate the influence of the single-scale and multi-scale models on the mechanical properties of the structure. [Methods] The large cantilever steel structure of Taiyuan south railway station roof is taken as the research object, the static full-scale test and theoretical analysis are carried out for the key joint (68# tubular joint). A detail construction method of “concrete + transverse diaphragm” was proposed and compared with the original joint construction method. Meanwhile, the single-scale model of the whole structure and the multi-scale model of key joints are established based on the midas Gen software. Then, the mechanical properties such as stability and dynamic response of the structure are particularly discussed. [Findings] Compared with the original joint construction, the bearing capacity of “C40 concrete + 5 transverse diaphragm” detail construction meets the requirements and has certain economy; Compared with the single-scale model, the overall stress of the multi-scale model structure is reduced by 9.70%; In the multi-scale model, the stress of the key joint is significantly different from that of the single joint, and the deformation and stress are reduced by 6.53% and 25.73%, respectively. [Conclusions] The multi-scale model can more realistically simulate the mechanical characteristics of the structure, and the results are more accurate.

Key words: multi-scale model; large-cantilever; tubular joint; detail construction method; mechanical property

Manuscript received: 2022-05-01; **revised:** 2022-05-26; **accepted:** 2022-06-12

Foundation item: Project (DC190000602) supported by Fund Program for the Scientific Activities of Selected Returned Overseas Professionals in Shanxi Province

Corresponding author: LIU Yuxiong (1998—) (ORCID: 0000-0003-3008-4690), male, master graduate student, research interest: steel structure and space structure. E-mail: 1084102925@qq.com

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:粟淼)