

C 型钢缀板柱的有限元模拟方法研究

冯士伦, 罗晨阳

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 缀板柱以其制造简便、稳定性高且价格低廉的优势, 在工程钢结构中得到了广泛应用, 如何准确模拟缀板与立柱之间的连接情况, 是工程结构有限元模拟时的重要问题。文章采用有限元软件 ANSYS, 研究 C 型钢缀板柱中缀板与立柱之间连接情况的有限元模拟问题, 通过对比单元整体建模与节点耦合建模的模拟结果, 分析了节点耦合连接方法的模拟原理并提出了使用时的注意事项。计算分析表明: 整体建模模拟效果较好但便于模型修改和精细化模拟, 节点耦合便于修改但需要考虑耦合方法和连接面积。文章提出的简化统一耦合方法模拟效果好, 适应性强, 对于工程实践中的有限元模拟工作具有一定指导意义。

关键词: 缀板柱; 结构加强; 单元整体建模; 节点耦合连接; 有限元模拟

中图分类号: TU398⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)02-0012-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.02.017

Research on finite element simulation method of the battened column of C-shaped steel

FENG Shilun, LUO Chenyang

(School of Civil Engineering and Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Due to the advantages of simple manufacturing, high stability and low price, battened column is widely used in engineering steel structures. How to accurately simulate the connection between the reinforcement plate and the column is an important issue in the finite element simulation of engineering structures. In this paper, the finite element software ANSYS is used to study the simulation method of the connection between the batten plate and the column in battened column of C-shaped steel column. The simulation principle of the node coupling connection method is analyzed and the precautions for use are proposed by comparing the simulation effect of modeling the unit as a whole and modeling of node-coupled connection. It is concluded that the effect of modeling as a whole is fine, but it is not convenient for model modification and refined simulation. The node-coupled connection is easy to modify, but the coupling method and connection area need to be considered. The simplifying unified coupling method proposed in this paper has good simulation effect and strong adaptability, which has certain guiding significance for the finite element simulation work in engineering practice.

Key words: battened column; structural strengthening; unit modeling as a whole; node coupled connection; finite element simulation

C 型钢是一种常用的结构材料, 广泛应用于建筑、桥梁、机械制造等领域, C 型钢的加强设计可以提高其结构性能, 增加承载能力和使用寿命, 优化结

构形态, 实现节能环保, 更重要的是 C 型钢的加强设计关系着结构的局部稳定性与整体安全性, 所以研究缀板与立柱之间的连接方法, 准确模拟结构整体强

收稿日期: 2023-08-15

作者简介: 罗晨阳(1998—), 男, 硕士研究生, 从事船舶结构与水动力领域研究。

通信作者: 冯士伦(1976—), 男, 博士, 副教授, 从事海洋工程研究。

度与局部强度对工程应用有着重要意义。

目前已有大量学者开展了缀板加固 C 型钢结构的研究。孙翰青^[1]总结出缀板间距、长细比、板件厚度对冷弯薄壁复杂卷边 C 型钢缀板柱稳定性能的影响规律; 胡启平等^[2]将缀板的作用视作对开口杆件的弹性支承, 用另一种思路来考虑带缀板的开口薄壁钢构件整体稳定性; 谭欣等^[3]以分肢截面, 分肢间距, 实轴与虚轴计算长度, 缀板尺寸与间距, 轴心压力, 缀条截面与布置角度为变化参数, 得到两种格构柱的最小用钢量; 王翠翠等^[4]采用缀板连接形式建立了方钢管混凝土柱 - 工字形钢梁节点的有限元模型, 与试验数据吻合良好; 郭相杰等^[5]采用 ABAQUS 对不同构造形式组合组框架进行有限元参数化分析, 格构式组合柱采用 60% 缀板面积连接, 实体式组合柱采用全缀板连接。

综上所述, 关于缀板加固的研究聚焦于缀板结构形式和位置布置, 使用有限元方法模拟需要特别考虑缀板连接的方式和连接面积的大小。本文以光伏电站的 C 型钢立柱为例, 说明节点耦合方法的模拟原理和使用技巧, 根据不同的模拟需求提出了对应的节点耦合连接方式, 以期可为之后工程结构的有限元模拟提供指导与参考, 提高模拟准确度, 从而避免模拟计算误差过大导致错误的结果, 降低严重的经济损失与伤亡事件发生的概率。

1 缀板模拟方法

对缀板进行有限元模拟时, 可以采用整体建模的方式, 即把 C 型钢立柱与缀板作为一个整体一起建模。这就需要提前规划, 在翼板上划分出与缀板交叉的部分, 并赋予叠加板的总厚度, 实现对缀板的模拟。如图 1、2 所示, 立柱 x 方向长度为 160 mm, y 方向宽度为 40 mm, z 方向高度为 1 340 mm, 缀板与立柱 x 方向的尺寸存在差异, 这会造成整体建模上的困难, 后期对缀板进行优化时也不方便修改缀板尺寸, 同时影响立柱其他部分的单元划分, 导致模拟结果出现误差。

为了方便缀板的有限元模拟, 解决整体建模存在的问题, 考虑使用节点位移耦合连接方法模拟 C 型钢立柱与缀板的连接, 即建模时立柱部分与缀板部分各自单独建模, 两者之间通过节点位

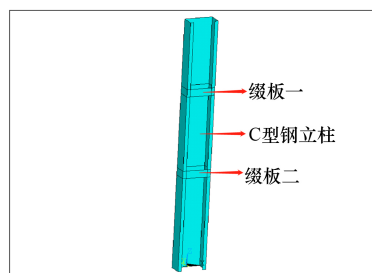


图 1 立柱简化模型

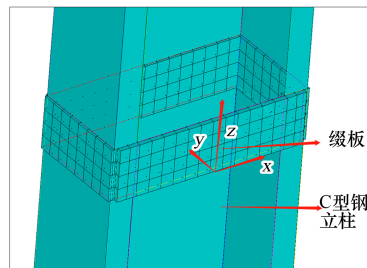


图 2 整体建模时缀板部分详图

移耦合方法保证位移和应力的传递, 实现对缀板的有限元模拟。ANSYS 软件的节点耦合命令可以确保同组节点具有相同的平动位移和转动位移, 只需构造好确保相同位移的节点组, 就可以很好地模拟 C 型钢立柱与缀板的连接。但是, 相同位移的节点组如果设计不好, 会使连接处出现应力集中, 从而导致计算结果失真。

为了考虑立柱在建模模拟时使用不同连接方式对立柱应力分布的影响, 以接近工程实际情况的整体建模方法为对照组, 对耦合连接方法的模拟结果进行对比分析。具体实现方法: 通过控制变量, 保证结构的边界条件与受力情况相同, 而使立柱模型的 C 型钢主体与缀板的加强部分采用 3 种不同的节点耦合连接方式, 观察立柱整体与缀板局部的应力分布有哪些特点, 进而分析不同连接方式的模拟结果的差异性, 最终得出节点耦合连接方式的合理使用方法。

立柱模型简化时, 底部约束简化为节点固定支撑, 使用右手笛卡尔坐标系, x 轴沿立柱横截面较宽的一边; y 轴沿横截面较窄的一边; z 轴沿高度方向, 向上为正。坐标原点位于立柱底部截面的几何中心。建模时, 通过定义材料的实常数、截面等属性来模拟实际钢材的特性。立柱建造采用的是 Q235 钢, 屈服强度为 235 MPa, 弹性模量取为 2.06×10^8 kPa, 主泊松比取 0.3, 钢的密度取 7.85×10^{-6} kg/mm³, 建模时使用 ANSYS 有限

元软件中的 shell181 单元。各组模拟分别考虑两种受力工况，即弯曲工况和扭转工况，如图 3、4 所示；各工况受力大小的设置标准为：柱顶均布受力使得整体建模组模型的最大应力达到屈服应力的 80%，即 188 MPa 左右。

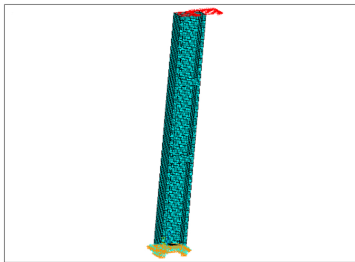


图 3 工况一：弯曲工况

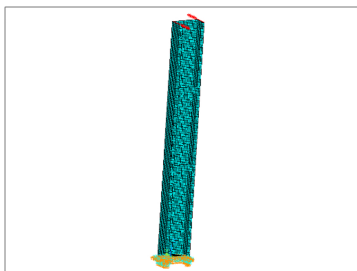


图 4 工况二：扭转工况

2 不同连接方法的介绍及其特性

2.1 整体建模

单元整体建模组如图 5 所示。整体建模模拟缀板的方法直观可靠，计算结果较为准确；但是不便于后续模型修改，例如要修改缀板位置，或改变缀板大小，只能重新建模，费时费力；另外受整体建模限制，只能模拟与 C 型钢立柱相同材料属性的缀板，不方便模拟不同材料属性的缀板。

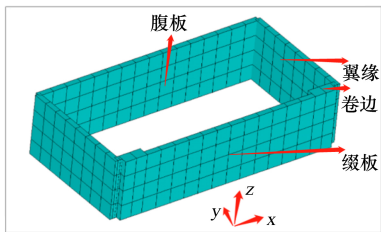


图 5 单元整体建模组（缀板长度略小于立柱）

2.2 耦合一：节点统一耦合

在模拟 C 型钢缀板与立柱的连接时，连接部分通常可视为一个整体来传递结构应力，因此模拟时考虑节点统一耦合的方法。即同时选择缀板与立柱相交部分的所有节点，统一进行节点耦合

连接，如图 6 所示，统一耦合 ABCabc 六列所有节点，共计 30 个节点，所有耦合节点位移与 A 列最下方节点（主绑定节点）保持一致（图 7）。

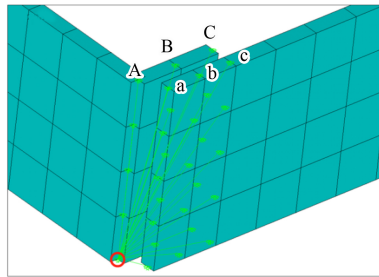


图 6 节点统一耦合连接组

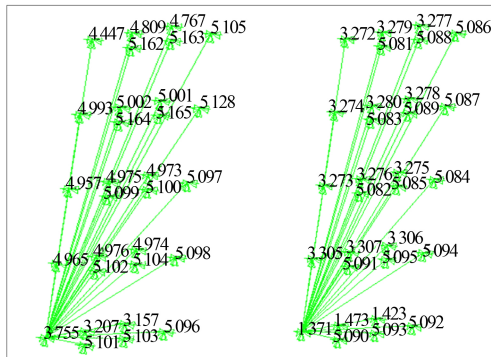


图 7 多节点统一耦合时的节点编号

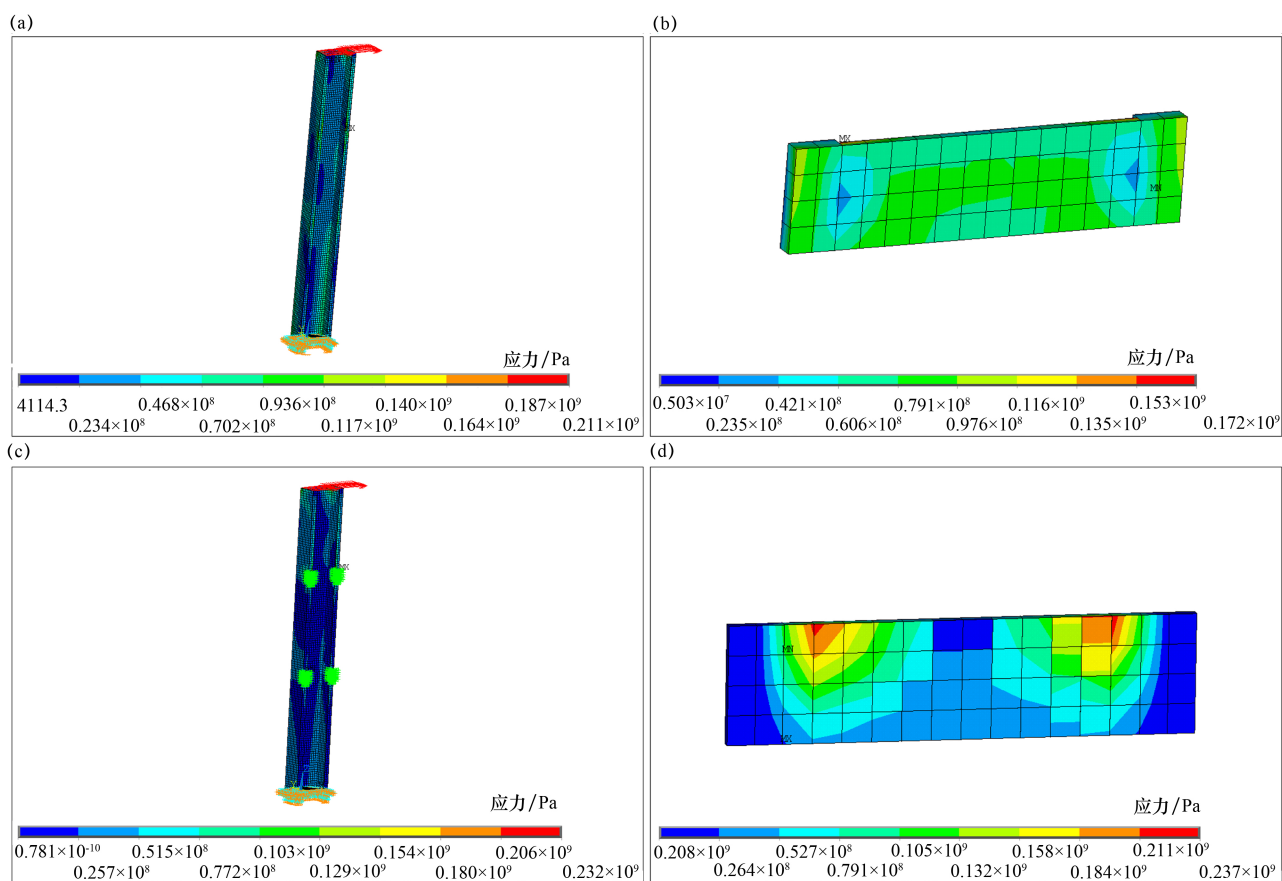
观察图 6 节点统一耦合的节点编号及计算结果发现：多个节点耦合时，其他节点的位移与主绑定节点保持一致，程序默认编号最小的节点为主绑定节点，通过对比模拟结果可以确定，主绑定节点的改变不影响绑定连接效果和最终计算结果。

弯曲工况下，节点统一耦合的计算结果与整体连接组的对比如图 8 所示。

在弯曲工况下，可以明显观察到节点统一耦合连接组的缀板一上出现了应力集中现象，应力集中的位置在缀板下侧紧邻耦合区域的单元上，与整体组应力集中位置不同，原因是整体耦合连接使得连接部分单元节点具有相同的位移，连接部分成为刚体，缀板相对于立柱刚度较小，两侧节点被施加强制位移导致紧邻耦合区的单元产生应力集中。为避免出现这种应力集中现象，考虑使用连接强度较弱的节点两两耦合方法进行绑定。

2.3 耦合二：节点两两耦合

与节点统一耦合不同的是，将之前统一耦合的节点根据位置对应关系两两成组，通过增加耦合组数，减弱缀板边缘的位移限制条件，以达到避免缀板出现应力集中的目的。如图 9 所示，即



(a) 整体连接组立柱; (b) 整体连接组缀板一; (c) 节点统一耦合组立柱; (d) 节点统一耦合组缀板一

图 8 弯曲工况下, 整体连接组与节点统一耦合连接组的应力云图对比

A 列与 a 列对应两两耦合, B 列与 b 列对应, C 列与 c 列对应。

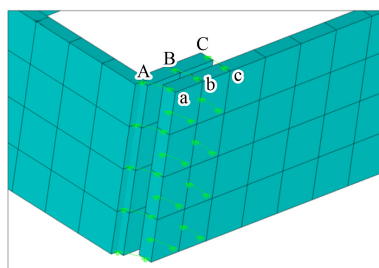


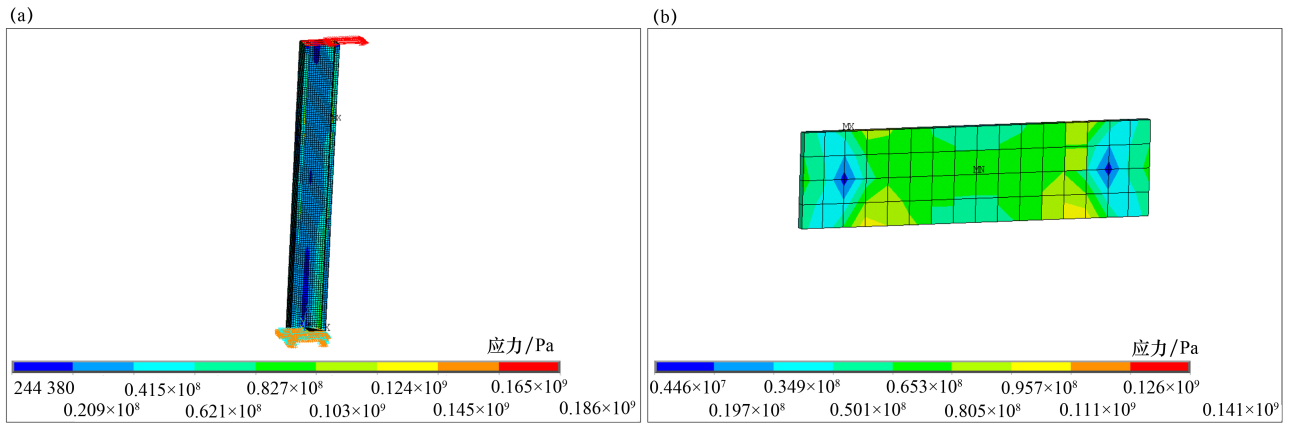
图 9 节点两两耦合连接组

将图 10 所示的节点两两耦合组的应力云图与节点统一耦合连接组进行对比, 同样在弯曲工况下, 节点两两耦合组的缀板一不再发生明显的应力集中现象, 说明该模拟方法可以有效避免节点统一耦合导致的应力集中; 其应力云图的分布情况与整体组建模的结果基本相同, 最大应力的发生位置也相同。缺点是节点两两耦合的连接强度低于整体组和节点统一耦合组, 导致立柱最大应力值显著下降, 立柱部分的模拟结果失真。

扭转工况下, 整体连接组与节点两两耦合组缀板一的应力云图如图 11 所示。由图 11 可知: 在扭转工况下, 同样观察到节点两两耦合方法的连接强度低于整体建模。受到节点两两耦合强度较弱的影响, 立柱加强部分不容易发生应力集中, 立柱的应力传递到缀板时, 缀板最大应力数值也发生显著下降。为了保证准确模拟立柱应力情况的同时, 避免缀板出现应力集中现象, 提出了简化统一耦合模拟方式。

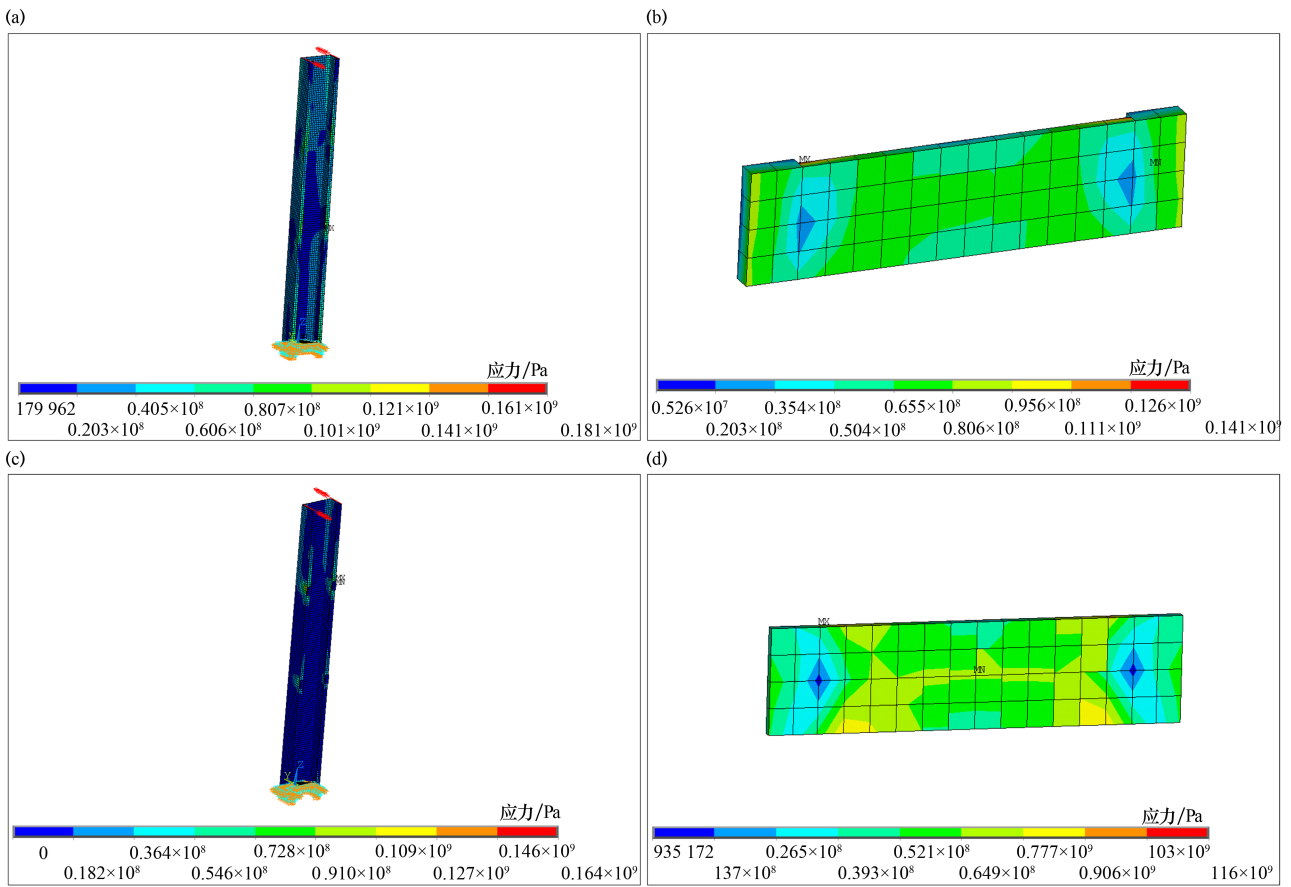
2.4 耦合三: 简化统一耦合

相较于节点统一耦合组, 不再耦合 b、c 列的所有节点, 即 A、B、C 列与 a 列的 20 个节点统一耦合 (图 12)。该方法综合了节点统一耦合法和节点两两耦合方法的优势, 立柱上统一耦合所有节点, 而缀板上只耦合最外侧的一列节点, 立柱的连接部分与缀板两侧位移保持一致保证了立柱部分的连接强度不会失真, 同时减小缀板上产生强制位移的面积, 避免了缀板上耦合节点较多导致的应力集中现象。



(a) 节点两两耦合组立柱；(b) 节点两两耦合组缀板一

图 10 弯曲工况下，节点两两耦合组的应力云图



(a) 整体连接组立柱；(b) 整体连接组缀板一；(c) 节点两两耦合组立柱；(d) 节点两两耦合组缀板一

图 11 扭转工况下，整体连接组与节点两两耦合组缀板一的应力云图

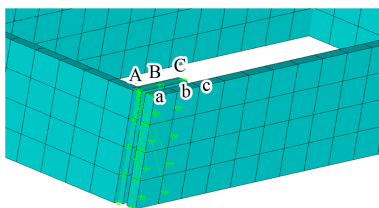


图 12 简化统一耦合连接组

将图 13 简化统一耦合组的应力云图与整体连接组进行对比，同样在弯曲工况下，简化统一耦合组的立柱应力数值接近整体组，缀板一上的应力也远低于节点统一耦合组，初步说明该模拟方法可以实现立柱和缀板应力的有效模拟。

继续观察图 14 扭转工况的计算结果，与整体

连接组数值对应较好, 误差低于节点统一耦合组和节点两两耦合组, 说明了该模拟方法的适应性。

4 种建模方法的计算结果汇总如表 1 所示。

观察模拟结果云图并结合最大应力汇总表可以得出以下结论:

(1) 多个节点耦合时, 所有节点的位移与主绑定节点保持一致, 程序默认编号最小的节点为主绑定节点, 主绑定节点的改变不影响绑定连接

效果和最终计算结果。

(2) 多个节点统一耦合对于立柱结构的计算结果误差相对较小, 但是会造成弯曲工况和扭转工况下缀板连接处的应力集中, 所以模拟时应该注意这种耦合方式导致的缀板应力失真。

(3) 节点两两分别耦合可以有效减少统一耦合导致的应力集中, 且应力云图的模拟结果较好, 接近单元整体建模组的分布情况, 但受到连接强

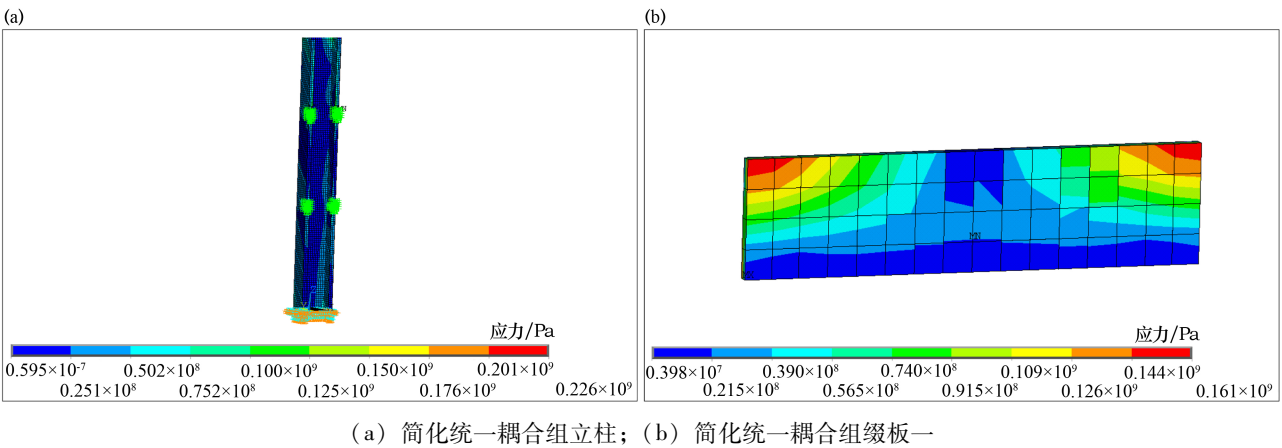


图 13 弯曲工况下, 简化统一耦合组的应力云图

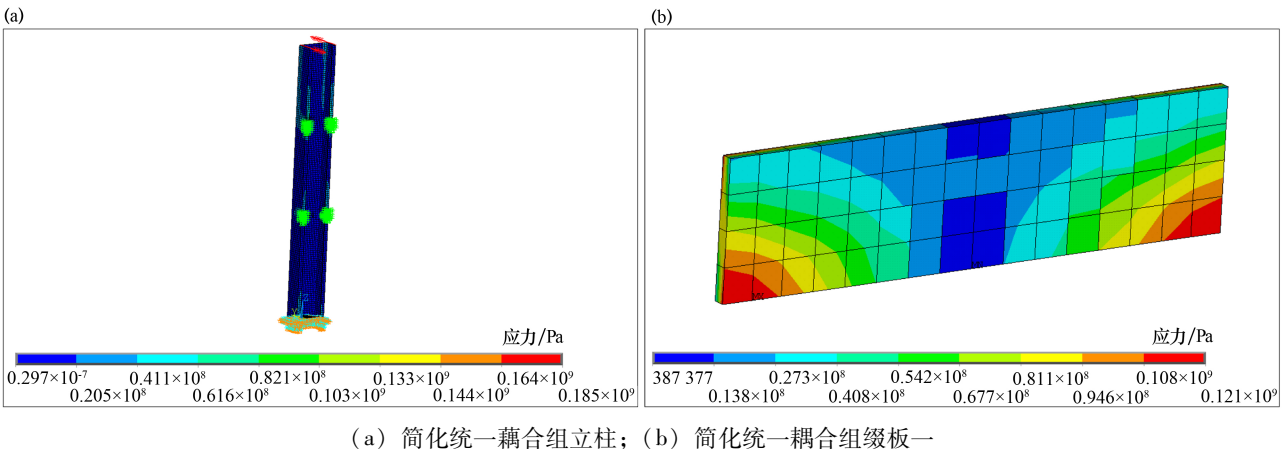


图 14 扭转工况下, 简化统一耦合组缀板一的应力云图

表 1 数值模拟计算结果汇总

缀板连接模拟方法		工况一(弯曲)			工况二(扭转)		
		立柱	缀板 1	缀板 2	立柱	缀板 1	缀板 2
整体建模	最大应力/MPa	211	172	130	181	141	118
	误差值/%						
耦合一	最大应力/MPa	232	237	122	164	168	71.3
	误差值/%	10	38	-6	-9	19	-40
耦合二	最大应力/MPa	186	141	109	152	116	99.3
	误差值/%	-12	-18	-16	-16	-18	-16
耦合三	最大应力/MPa	226	161	138	185	121	106
	误差值/%	7	-6	6	2	-14	-10

文结合大源渡航电枢纽跨船闸上游引航道拱桥工程实例, 对其进行空间有限元模型建立和环境振动试验及模态参数识别, 得出结论如下。

(1) 在环境自然激励下, 桥梁的实测振动参数(频率和振型)与有限元模型计算结果吻合较好; 桥梁实测频率值比有限元模型计算结果大, 反映了桥梁实际刚度大于设计值。

(2) 实测结果与有限元模型计算值吻合较好, 也证明了试验方法的可行性和试验结果的准确性。

(3) 实测的桥梁自振参数, 是今后桥梁养护、状态评估和健康检测的基准数据。

(4) 对既有桥梁开展环境振动试验具有可靠、简便、不中断桥梁正常通行等优势, 是桥梁动力参数测试的有效手段。

参考文献:

- [1] RYTTER A. Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures[D]. Denmark: Department of Building

Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, 1993.

- [2] 余天庆, 陈开利, 彭苗. 桥梁结构的损伤现代检测与评估. 世界桥梁, 2004(2): 52-55.
- [3] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社知识产权出版社, 2006.
- [5] 曹树谦, 张文德, 萧龙翔. 振动结构模态分析: 理论、实验与应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- [6] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [7] 戴恩彬. 应变模态分析及参数识别[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [8] 任伟新, 林友勤, 彭雪林. 大跨度斜拉桥环境振动试验与分析[J]. 实验力学, 2006(4): 418-426.
- [9] 张立明. Algor、Ansys 在桥梁工程中的应用方法与实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

(上接第 17 页)

度的影响, 对于该立柱模型, 最大应力值的模拟结果误差较大。

(4) 简化统一耦合方法综合了以上两种耦合方式的优点, 在 3 种典型受力工况下均可以达到最接近整体建模模拟计算的数值结果, 即对最大应力值的模拟效果最好, 能够满足工程建模需要。

3 结论及建议

通过研究 C 型钢立柱的缀板连接方法, 说明了不同耦合连接情况下, 加劲小构件对主体大型构件的影响, 所得结论适用于主体构件的局部加强。

(1) 对比了不同建模方法对于缀板连接(即面-面绑定连接)的模拟效果, 基于已有工程经验可知, 整体建模的模拟方法最接近工程实际, 但其建模过程较为复杂且不能模拟不同材料的连接, 也不便于后续模型修改。

(2) 节点耦合连接方法适用范围广, 便于进行后续模型修改。根据模拟计算结果可知, 缀板与立柱耦合连接时, 由于缀板面积较小, 统一耦合的节点过多会造成缀板上的应力集中; 相对于节点统

一耦合, 节点两两耦合的连接强度会发生显著下降, 对立柱的加强作用减弱, 导致模拟结果失真。

(3) 综合以上两种耦合方法提出的简化统一耦合能够同时满足立柱和缀板的理想模拟结果。实际应用时, 应在保证加劲小构件对大构件加强作用基本不变的情况下, 适当减小小构件上的统一耦合面积, 避免产生应力集中。

参考文献:

- [1] 孙瀚青. 冷弯薄壁复杂卷边 C 形钢双肢缀板柱轴压性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [2] 胡启平, 韩璐. 带缀板的开口薄壁钢构件整体稳定分析[J]. 江西建材, 2015(9): 6-7.
- [3] 谭欣, 潘雨辰. 轴心受压格构式缀板与缀条柱选型对比研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 27-31.
- [4] 王翠琴, 刘忠, 张孝芳, 等. 方钢管混凝土柱-工字型钢梁节点受力性能的非线性有限元分析[J]. 桂林理工大学学报, 2011, 31(4): 558-563.
- [5] 郭相杰, 杨晓明, 韩孝坤, 等. 缀板式钢管混凝土组合柱框架有限元分析[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(3): 41-44, 50.