

基于 OpenSees 的中心支撑钢框架有限元模拟

马多成

华南理工大学土木与交通学院 广东广州 510641

摘要: 中心支撑钢框架结构作为钢结构中常见的结构设计体系,其抗震性能优异,在地震作用下支撑构件可通过受拉屈服与受压屈曲的行为实现结构在地震作用下的耗能。本文基于 OpenSees 有限元软件建立数值模型,利用零长单元模拟支撑两端节点板连接的半刚性特性,利用疲劳单轴材料预测支撑构件的延性,以模拟支撑反复拉压过程中的疲劳断裂特性,并通过对一层一跨、三层一跨、两层两跨中心支撑钢框架实验进行建模分析,验证了本文所提出的 OpenSees 数值模型的准确性。

关键词: 中心支撑钢框架结构、OpenSees 模拟、节点板、支撑延性

中心支撑-钢框架结构体系为多高层钢结构中常用的结构形式,其中支撑部分是结构在受力过程中易发生破坏的部分,支撑的屈曲以及断裂将会造成结构的承载力以及刚度下降,现有结构计算模型往往不能反映支撑真实受力时的屈曲以及破坏特性。节点板作为支撑与框架连接的关键节点,其表现为半刚性特性,但以往的结构计算模型中不考虑节点板的影响,将其简化为纯刚接或铰接。以上因素均会对结构计算结果造成较大影响,应当在结构受力分析时给予其充分考虑。

Hsiao 等^[1]对以往的特殊中心支撑框架实验进行总结,提出了中心支撑框架结构的简化数值模型,在该模型中将支撑节点板简化为半刚性节点进行计算,以更为准确地捕捉结构中的强非线性响应。张薇^[2]对支撑节点板连接处的复杂受力性能进行了研究,在 Hsiao 的数值模型基础上进行改进,提出了能反映节点板处受力特性的中心支撑钢框架简化数值模型。Fell 等^[3]对 18 组单个支撑进行了拉压往复实验,分析了支撑的截面形状、长细比等因素对支撑屈曲断裂特性的影响。张文元等^[4]利用欧拉公式反推支撑两端节点板对支撑的约束程度,通过大量支撑受压情况下的有限元参数分析,给出了将支撑两端节点板连接简化为半刚性连接时半刚性节点的转动刚度计算公式。崔瑶等^[5]考虑节点板与支撑断裂的中心支撑钢结构进行抗倒塌研究,结果表明,不考虑支撑断裂时,结构的抗倒塌指标偏大,因此在中心支撑钢结构设计与分析时考虑节点板与支撑断裂的影响可更准确地评估结构抗震性能。

从以往研究中可以看出,节点板以及支撑的屈曲断裂特性将会对结构分析结果的准确性产生较大影响,有必要对支撑以及连接节点板进行合理处理,在结构分析时建立与实际工程更为贴合的精细化结构分析模型。因此,本文基于 OpenSees 软件建立起考虑支撑断裂以及节点板作用的强非线性数值分析模型,并利用国内外典型实验原型建立有限元模型,对比两者计算结果,验证本文所提出的中心支撑钢结构数值模型的准确性,为进一步进行结构的抗震性能分析以及结构的优化研究奠定基础。

1 OpenSees 有限元模型建立

1.1 梁柱的建模

梁柱构件采用 OpenSees 中的基于力的梁柱单元 (forceBeamColumn) 进行建模,由于梁柱不是结构中产生几何非线性的主要构件,故只采用一个基于力的梁柱单元来进行模拟,采用纤维截面模拟 H 型梁柱截面,钢材本构使用 Steel02 材料,材料强化系数设置为 0.0 1。

1.2 支撑的建模

由于支撑在受力过程中会产生受压屈曲特性,为模拟该特性,在支撑杆件中部设置千分之一的初始缺陷^[6]。本文采用 6 个基于位移的梁柱单元 (dispBeamColumn) 对支撑进行建模,如图 1 所示,每个杆件端部节点按计算进行空间上的偏移,使支撑中点偏移量满足支撑长度千分之一的要求。

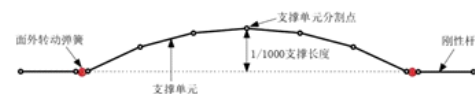


图 1 支撑单元示意图

使用 OpenSees 中的疲劳单轴材料 (Fatigue Material) 来模拟支撑纤维达到应变极限后的断裂。为提高结构的收敛性,在支撑处设置刚度极小的 corotTruss 单元。现有研究通过对中心支撑实验进行统计分析,开发出多种计算支撑纤维极限应变的数学模型,本文所用支撑极限应变计算模型为 Lignos 模型^[7]。

1.3 梁柱节点及支撑节点板的建模

通过对梁柱连接处的自由度进行设置来模拟刚接与铰接形式的梁柱节点,对于梁柱半刚性连接,可将该节点等效为面内转动弹簧,通过设置零长单元 (zeroLength) 来进行模拟,材料采用 Steel02 本构模型。半刚接节点的转动刚度及承载力可由经验公式、组元法计算或其它有限元模拟方式得到^[8]。

支撑两端的节点板作为连接支撑与框架结构的关键部分,在支撑发生平面外屈曲变形时节点板会出现平面外变形,因此可将其等效为面外转动弹簧,采用零长单元进行模拟,材料采用 Steel02 本构模型,面外转动弹簧的计算刚度以及屈服弯矩参考 Yoo 等^[9]研究所得出的计算公式,见式 1.1。为考虑节点板对梁柱节点处刚度的增强,参考 Hsiao 等^[1]对节点板处梁柱节点进行处理。

$$K = \frac{E}{L_{ave}} \left(\frac{W_w t^3}{12} \right) \quad (1.1a)$$

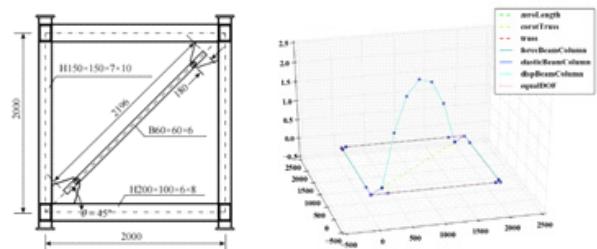
$$M_y = \frac{W_w t^2}{6} F_{y,gusset} \quad (1.1b)$$

式中 E 为钢材的弹性模量, W_w 为节点板的有效宽度, t 为节点板的厚度, L_{ave} 为节点板有效长度, $F_{y,g}$ 为节点板的屈服强度。

2 基于实验的有限元模拟验证

2.1 一层一跨中心支撑钢框架

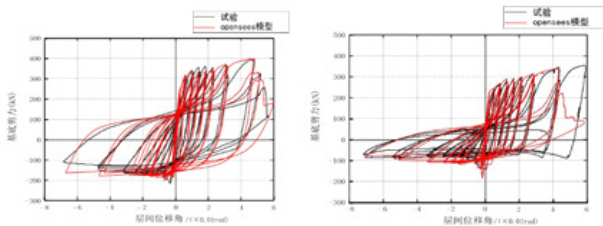
张薇等^[2]为研究支撑节点板连接处复杂受力性能,进行了四组一层一跨中心支撑实验,本文选取其中两组实验互为对照组,两组实验变化的参数为梁柱节点连接方式,一组采用全焊接方式,本文将其简化为刚接处理,编号为 HS;另一组采用剪切板连接,本文将其简化为铰接进行处理,编号为 HP,实验构件图见图 2 (a)。有限元模型如图 2 (b) 所示。



(a) 一层一跨中心支撑试件 (b) 一层一跨中心支撑有限元模型

图 2 一层一跨中心支撑实验及有限元模型示意图

有限元结果与实验结果对比见图 3, 从图中可以看出, 无论梁柱节点处是刚接还是铰接, 有限元与实验进行较好的拟合, 本文所提出有限元模型可较为准确地预测整体结构的受拉、受压承载力。

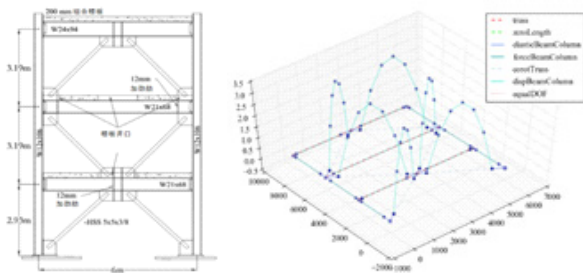


(a) HS 模型计算结构对比 (b) HP 模型计算结构对比

图 3 一层一跨中心支撑实验与有限元结果对比

2.2 三层一跨中心支撑钢框架

Lumpkin 等^[10]为研究特殊中心支撑框架的抗震性能, 进行了三层一跨跨层 X 型中心支撑结构实验, 实验构件如图 4 (a) 所示, 有限元模型如图 4 (b) 所示。



(a) 三层一跨中心支撑试件 (b) 三层一跨中心支撑有限元模型

图 4 三层一跨中心支撑实验及有限元模型示意图

有限元结果与实验结果对比见图 5, 由于结构为跨层 X 型中心支撑结构, 结构受压承载力与受拉承载力趋于一致, 实验与有限元模拟结果可较好拟合。

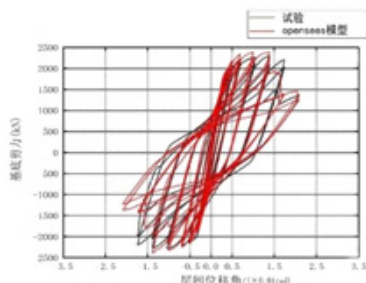
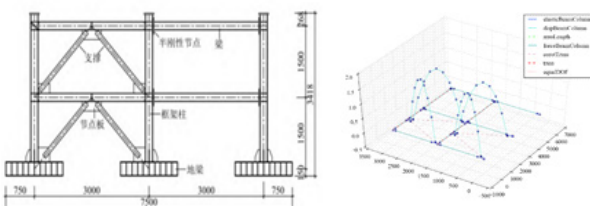


图 5 三层一跨中心支撑实验与有限元结果对比

2.3 两层两跨中心支撑钢框架

杨融谦^[11]等为研究中心支撑与半刚性钢框架的协同工作性能, 进行了三组两层两跨中心支撑实验, 该中心支撑框架左跨为人字形中心支撑框架, 右跨为半刚性框架, 实验变化参数为右侧半刚性节点类型, 本文选取其中一组外伸端板连接的实验进行模拟, 实验装置如图 6 (a) 所示。各实验参数见参考文献: ^[11], 有限元模型如图 6 (b) 所示。



(a) 两层两跨中心支撑试件 (b) 两层两跨中心支撑有限元模型

图 6 两层两跨中心支撑实验及有限元模型示意图

有限元结果与实验结果对比见图 2-6, 层间位移角较小时, OpenSees 有限元模拟结果略小于实验值, 这是由于实验时底层柱下

地梁的存在使底层柱的实际长度小于 1.5m, 但有限元分析时底层柱按 1.5m 进行建模, 实验刚度大于有限元模型刚度。

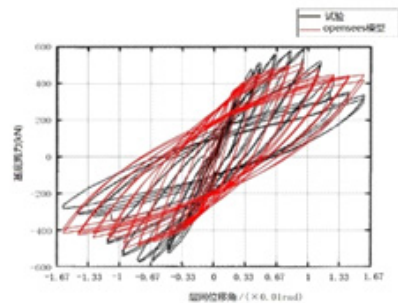


图 7 两层两跨中心支撑实验与有限元结果对比

3 结论

本文详细介绍了考虑节点板以及支撑延性时中心支撑钢框架在 OpenSees 软件中的建模方法, 并基于三组中心支撑钢框架低周往复加载实验与 OpenSees 有限元模拟结果对比, 得出如下结论:

(1) 本文有限元计算所得结构承载力与实验结果误差皆在可接受范围内, 相对于实验滞回曲线, 有限元滞回曲线更为饱满, 这是由于有限元分析计算中不考虑材料的初始缺陷以及实验中其它偶然误差所造成的。

(2) 本文所提出的有限元建模方法可以准确地预测出中心支撑钢结构的受拉、受压承载力, 反映中心支撑钢结构在低周往复加载下支撑疲劳断裂所造成的承载力和刚度的降低, 可将本文所提出中心支撑结构 OpenSees 有限元模型用于结构抗震性能评估及结构优化中。

参考文献:

- [1]Po-Chien Hsiao, Dawn E. Lehman, Charles W. Roeder. Improved analytical model for special concentrically braced frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 73.
 - [2]张薇. 延性中心支撑框架节点板连接的抗震性能研究[D]. 大连理工大学, 2019.
 - [3]B. V. Fell, A. M. Kanvinde, G. G. Deierlein, A. T. Myers. Experimental Investigation of Inelastic Cyclic Buckling and Fracture of Steel Braces[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135 (1) .
 - [4]张文元, 曾立静, 齐欣, 赵增阳. 节点板式连接对 H 形钢支撑面外稳定性能的影响[J]. 工程力学, 2021, 38 (12): 172-182.
 - [5]崔瑶, 许肖卓, 林迟. 考虑支撑断裂及节点板作用中心支撑框架抗震性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37 (10): 85-92.
 - [6]Sizemore J G, Fahnestock L A, Hines E M. Seismic performance assessment of low-ductility concentrically braced frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145 (4): 1- 11.
 - [7]Karamanci E, Lignos D G. Computational approach for collapse assessment of concentrically braced frames in seismic regions [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2014, 140 (8): A4014019.
 - [8]陈士哲. 对组件法的修正与改进及其在钢结构节点本构关系研究中的应用[D]. 华南理工大学, 2015.
 - [9]YOO J H. Analytical investigation on the seismic performance of special concentrically braced frames [D]. Seattle : University of Washington, 2006.
 - [10]Lumpkin E J, Hsiao P C, Roeder C W, et al. Investigation of the seismic response of three-story special concentrically braced frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 77 (10): 131-144.
 - [11]杨融谦, 周学军. 基于不同构造形式半刚性节点的人字形中心支撑钢框架低周往复荷载试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23 (12): 75-84. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.008.
- 作者简介: 马多成, 出生于 1999 年, 在读硕士, 从事结构优化等方面的研究。