

基于ABAQUS的预制混凝土柱 - 钢梁节点抗震性能分析

袁世伟, 王伟哲, 宁 静, 陈 刚*

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2024年6月24日; 录用日期: 2024年7月18日; 发布日期: 2024年7月29日

摘 要

为了更好地利用钢管混凝土柱的优异性能, 提出了一种预制混凝土柱 - 钢梁节点, 为研究其抗震性能, 通过ABAQUS进行模拟, 分析试件的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线、耗能能力和节点处应变。模拟结果表明: 节点试件的节点域均处于弹性阶段, 应力最大部分在钢板和工字梁的连接处, 并且工字梁发生局部屈曲, 随着轴压比的逐渐增大, 节点的极限承载力逐渐减小, 节点的抗震性能均满足规范设计要求, 试件的破坏形态为梁端塑性铰破坏, 发生梁端塑性铰破坏的节点试件具有较好的变形和耗能能力, 由于模拟时的边界条件以及钢筋与混凝土之间的粘结滑移与试验时不同, 所以所得到的滞回环饱满程度不同, 但大体符合规范要求。

关键词

有限元, 钢梁节点, 抗震性能, 滞回曲线

Seismic Performance Analysis of Precast Concrete Column Steel Beam Joints Based on ABAQUS

Shiwei Yuan, Weizhe Wang, Jing Ning, Gang Chen*

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 24th, 2024; accepted: Jul. 18th, 2024; published: Jul. 29th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 袁世伟, 王伟哲, 宁静, 陈刚. 基于 ABAQUS 的预制混凝土柱-钢梁节点抗震性能分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(4): 4802-4810. DOI: 10.12677/mos.2024.134434

Abstract

In order to better utilize the excellent performance of steel-tube concrete columns, a precast concrete column-steel beam node is proposed, and in order to study its seismic performance, simulations are carried out through ABAQUS to analyze the damage morphology, hysteresis curves, skeleton curves, energy dissipation capacity, and strain at the nodes of the specimens. The simulation results show that: the node domains of the node specimens are in the elastic stage, the maximum stress is in the connection between the steel plate and the I-beam, and the I-beam is locally buckled, with the gradual increase of the axial compression ratio, the ultimate capacity of the node decreases, the seismic performance of the node meets the code design requirements, and the damage mode of specimen is the damage of the plastic hinge of the beam end, and the node specimen which occurs the damage of plastic hinge of the beam end has better deformation and energy-consuming capacity. Because the boundary conditions and the bond slip between reinforcement and concrete in the simulation are different from those in the test, the hysteresis loops obtained have different degrees of fullness, but they generally meet the requirements of the code.

Keywords

Finite Element, Steel Beam Joint, Seismic Performance, Hysteretic Curve

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢管混凝土柱具有承载力和刚度大、经济性优、便于施工等特性，在冶金、电力及建筑诸多行业获得广泛运用[1]。在钢管混凝土柱和钢梁连接节点形式中，内隔板式连接节点[2] [3]、外环板式连接节点[4] [5]、隔板贯通式连接节点[6]和单边螺栓端板式连接节点[7]具有较好的力学性能和经济性。Fang Yuan 等[8]通过试验研究和有限元分析来研究方形截面加劲钢管混凝土构件的偏心受压性能，从破坏形态、荷载-变形响应、钢管变形、钢管与核心混凝土的相互作用以及核心混凝土的轴向应力分布等方面详细分析了加劲钢管混凝土构件的工作机理，结果表明该构件具有良好的力学性能。根据规范《钢管混凝土结构技术规范》[9]的规定，将隔板式连接节点作为钢管混凝土柱与钢梁的连接较为可靠。

尽管钢管混凝土柱的抗震性及经济性都较好，但是在工程实际应用中通常会突出墙体影响美观，并且采用隔板式连接不利于内部混凝土的浇灌，在现场施工时，钢板的焊接也比较困难，为了解决此类问题，本文设计了一种柱-钢梁节点，通过内置高强螺旋箍筋增强节点的整体性能，该节点充分地发挥了混凝土的抗压性能好及钢筋的抗拉性能好的优势，且节点构造相对简单。针对以上问题，本文提出了一种钢梁节点，参考 Cristhian R O 等[10]用有限元对节点的抗震性能数值评估，对于不同的混凝土强度，进行单推试验，对于不同的柱轴压比，进行低周往复加载模拟试验，分别研究节点的破坏形态、滞回性能和耗能能力等，为该节点在实际工程中的应用做相关参考。

2. 节点设计

结合青岛市某装配式钢结构住宅项目，本文选取框架结构中柱节点作为参照对象，根据《建筑抗震

设计规范》[10]和《钢结构设计规范》[11],在满足“强柱弱梁”的设计要求下,确定钢梁以及柱子的尺寸,柱和梁的反弯点均处于中间位置。节点构造图,如图 1 所示。

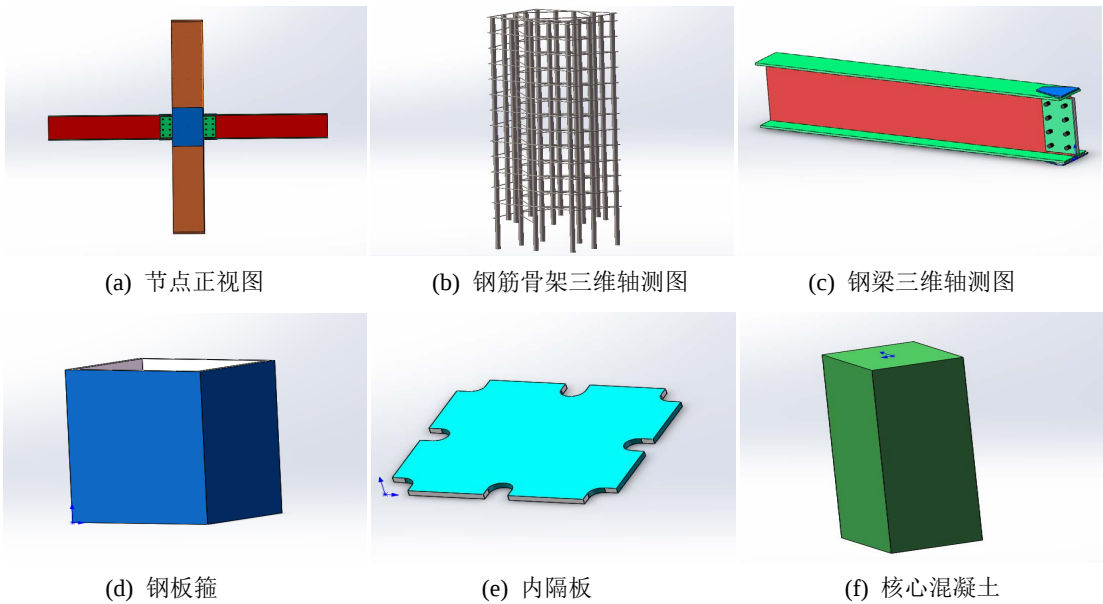


Figure 1. Node structure diagram
图 1. 节点构造图

该节点的构造主要包括以下:高强螺旋箍筋骨架、工字梁、螺栓、内嵌钢侧板、核心区混凝土、节点区的钢板箍和内隔板。这种构造可以充分的利用钢材和混凝土的性能,高强的螺旋箍筋骨架能够增强构件的抗弯和抗剪能力,合适的工字梁和钢板箍的连接方式可以很好地增加节点的延性和抗震能力。其中翼缘和腹板连接部分采用焊接方式,翼缘和核心区连接采用螺栓连接,内嵌侧板外伸段在发挥传递钢梁翼缘力偶矩作用的同时,还加强了端部钢梁的承载力和刚度,有利于实现梁端塑性铰的外移。

本文主要研究的节点构件为 c40 核心混凝土的构件,然后在此基础上分别采用不同的轴压比。采取控制变量法,边界控制和加载方式相同,逐个分析该节点在不同轴压比和在不同强度混凝土下的性能变化。主要研究的性能有:屈服荷载和极限荷载,构件的延性,根据滞回环检测其耗能能力和变形能力,混凝土的损伤等。不同节点的名称如表 1 所示,其中 GH 代表钢筋混凝土,A 代表混凝土的强度等级。

Table 1. Node name
表 1. 节点名称

混凝土强度	轴压比	名称
c40 混凝土	轴压比 0.2 节点	GH-A-0.2
c40 混凝土	轴压比 0.3 节点	GH-A-0.3
c40 混凝土	轴压比 0.4 节点	GH-A-0.4
c40 混凝土	轴压比 0.5 节点	GH-A-0.5
c40 混凝土	轴压比 0.6 节点	GH-A-0.6
c40 混凝土	轴压比 0.7 节点	GH-A-0.7

3. 有限元分析

3.1. 有限元模型的建立

为了提高有限元的收敛性,在不影响构件的性能和试验结果的准确性的前提下,对于模型进行了适当的优化。这样既可以加快软件的运行速度,且不影响节点之间的性能对比。与理论分析结合较好。所优化的内容有:对于工字梁和钢板箍的连接,取消螺栓和内嵌钢侧板,直接采用焊接的方式将其连接,内隔板的钢筋预留孔也进行简化,改为全封闭,根据以往的研究,加劲肋对于本文节点的影响并不大,所以也适当优化了加劲肋。在 ABAQUS 中,为了加快运行速度,并且有利单元网格的划分,大体积混凝土采用的是实体单元,钢筋采用桁架单元,工字梁,钢板箍和内隔板采用壳单元。各构件的尺寸、和所用材料如下所示。

工字钢梁:腹板厚度为 8 mm,翼缘厚度为 12 mm,长度 1600 mm,宽度 400 mm,高度 350 mm。数量:2,所用材料 Q235。核心混凝土:截面尺寸为 400 mm × 400 mm,高度 3000 mm,数量:1,所用材料: c40 和 c50。钢板箍:截面尺寸为 400 mm × 400 mm,厚度 16 mm,高度 550 mm,数量:1,所用材料: Q235。内隔板:截面尺寸为 368 mm × 368 mm,厚度 12 mm,数量:2,所用材料: Q235。高强螺旋箍筋:横截面面积为 28.27 mm²,数量:2,所用材料: HPB300。长纵筋:横截面面积为 314.15 mm²,长度 3000 mm,数量:8,所用材料: HRB400。短纵筋:横截面面积为 314.15 mm²,长度 1325 mm,数量:8,所用材料: HRB400。

以上构件通过合适的连接方式组成本文需要研究的节点,并且设置较为合理的接触方式,钢材之间设置通用的接触方式,其中切向力的摩擦系数设置为 0.3,法向接触设置为硬接触。钢材和混凝土的切向力的摩擦系数设置为 0.6,法向接触设置为硬接触。工字梁和钢板箍依靠焊缝连接,内隔板和钢板箍也依靠焊缝连接,在 ABAQUS 中设置为绑定约束。其中,由于钢筋骨架和混凝土的接触面积过大,受力过于复杂,所以设置钢筋骨架内置于混凝土内,提高该节点的运行速度和收敛性。

3.2. 材料的本构关系

混凝土:在柱顶竖向荷载作用(轴压力)下,壁柱内填混凝土受到壁柱钢管侧向约束处于三向受力状态,混凝土的单轴抗压强度会提高。考虑壁柱钢管对内填混凝土约束影响,本文采用提出的矩形钢管内约束混凝土应力-应变关系曲线,如图 2(a),图 2(b)所示。

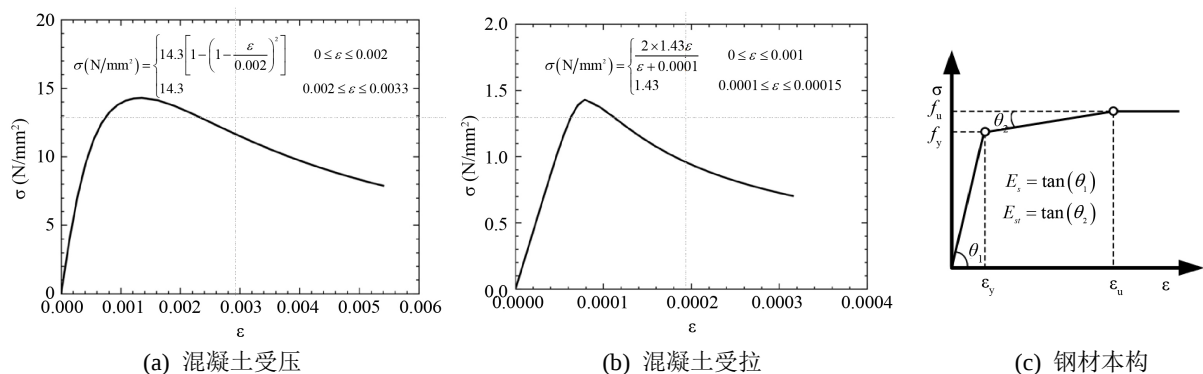


Figure 2. Material constitutive diagram
图 2. 材料本构关系图

钢材:为便于后续的理论分析,本文将钢材单向拉伸的应力应变关系进行简化。参考以往文献例如

王萌等[12]的《低屈服点 LYP160 钢材本构关系研究》，本文有限元分析中钢材采用了图 2(c)所示的三折线简化模型，不考虑钢材的二次塑流效应。

3.3. 构件的加载方式

本文利用有限元软件 ABAQUS 对试件进行数值模拟加载，预测不同节点试件的水平屈服荷载 P_y ，水平荷载加载方式采用《建筑抗震方法试验规程》[14]推荐的荷载 - 变形双控制法，具体试验加载步骤如下：

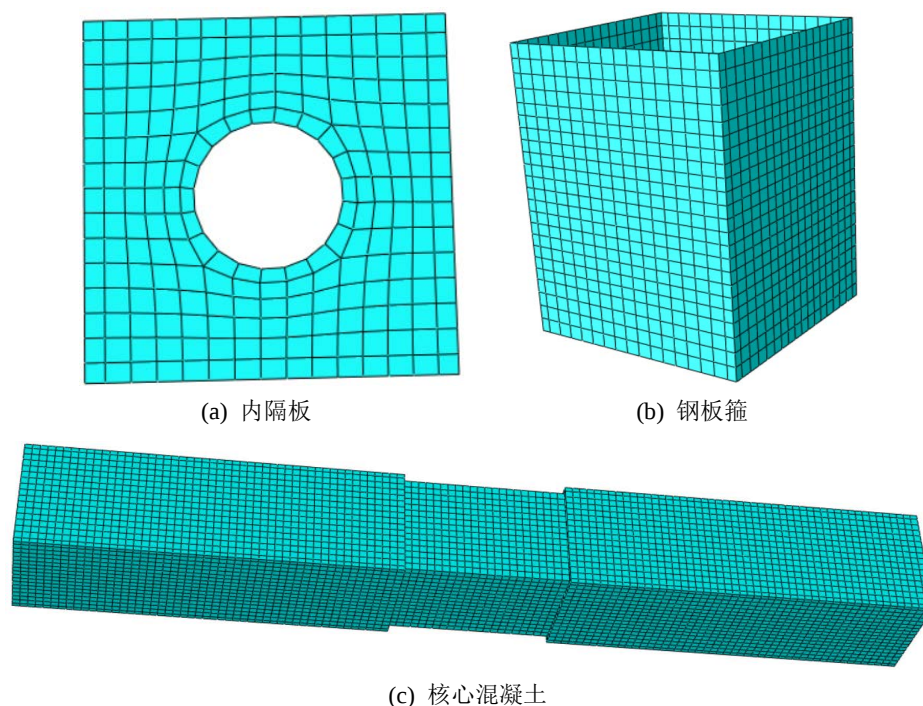
1) 按照壁柱试验轴压比为 0.3，通过油压千斤顶在柱顶施加恒定竖向荷载 N_0 ；在施加竖向荷载过程中，加载梁端部 MTS 作动器全程处在放松状态，待加载到预定荷载 N_0 后，再将加载梁端部与 MTS 作动器锁紧。

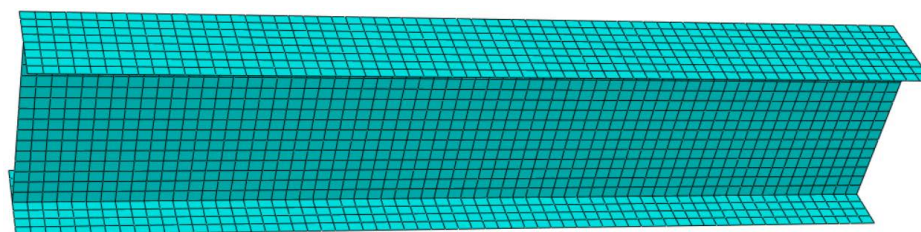
2) 通过 MTS 作动器在加载梁中心点施加水平循环荷载；在水平荷载达到有限元预测屈服荷载 P_y 前采用荷载控制分级加载，每级荷载取为 $0.2P_y$ 并循环往复一次；试件进入屈服前，结合实际滞回曲线和应变片数据实时调整加载，当判定试件进入屈服时，记录此时柱顶位移作为该试件的水平屈服位移 Δy 。

3) 试件屈服后，以 $0.5\Delta y$ 为级差进行位移控制加载，每级荷载循环往复三次，逐步增大水平位移，当加载至水平荷载下降至极限荷载的 85%或试件出现严重破坏时，试验停止。

3.4. 网格划分

有限元模型的网格划分是影响求解收敛性的重要因素，选取合适的网格尺寸及划分方式尤其重要。此外，混凝土具有开裂和压碎的特性，使得具有此类单元的有限元模型收敛性较差。本文在正式计算前，经过大量的网格划分试算，确定模型网格划分方式如下：壁柱土短边方向壳单元尺寸取为 25 mm；壁柱土长边方向壳单元尺寸取为 30 mm；壁柱高度方向壳单元尺寸取为 25 mm；钢梁翼缘宽度方向壳单元尺寸取为 25 mm；对于模拟混凝土的实体单元，壁柱短边方向尺寸取为 45 mm，壁柱长边方向尺寸取为 55 mm，壁柱高度方向尺寸取为 50 mm。划分结果如图 3 所示。





(d) 工字梁

Figure 3. Schematic diagram of grid division

图 3. 网格划分示意图

4. 试验结果及分析

4.1. 骨架曲线

骨架曲线是指将同方向(拉或压)加载的应力-应变曲线中,超过前一次加载最大应力的区段平移相连后得到的曲线称为骨架曲线。也可表述为滞回曲线上同向(拉或压)各次加载的荷载极值点依次相连得到的包络曲线称为骨架曲线。骨架曲线是每次循环加载达到的水平力最大峰值的轨迹,反映了构件受力与变形的各个不同阶段及特性(强度、刚度、延性、耗能及抗倒塌能力等),也是确定恢复力模型中特征点的重要依据。图 4 为该节点在不同轴压比下的骨架曲线。

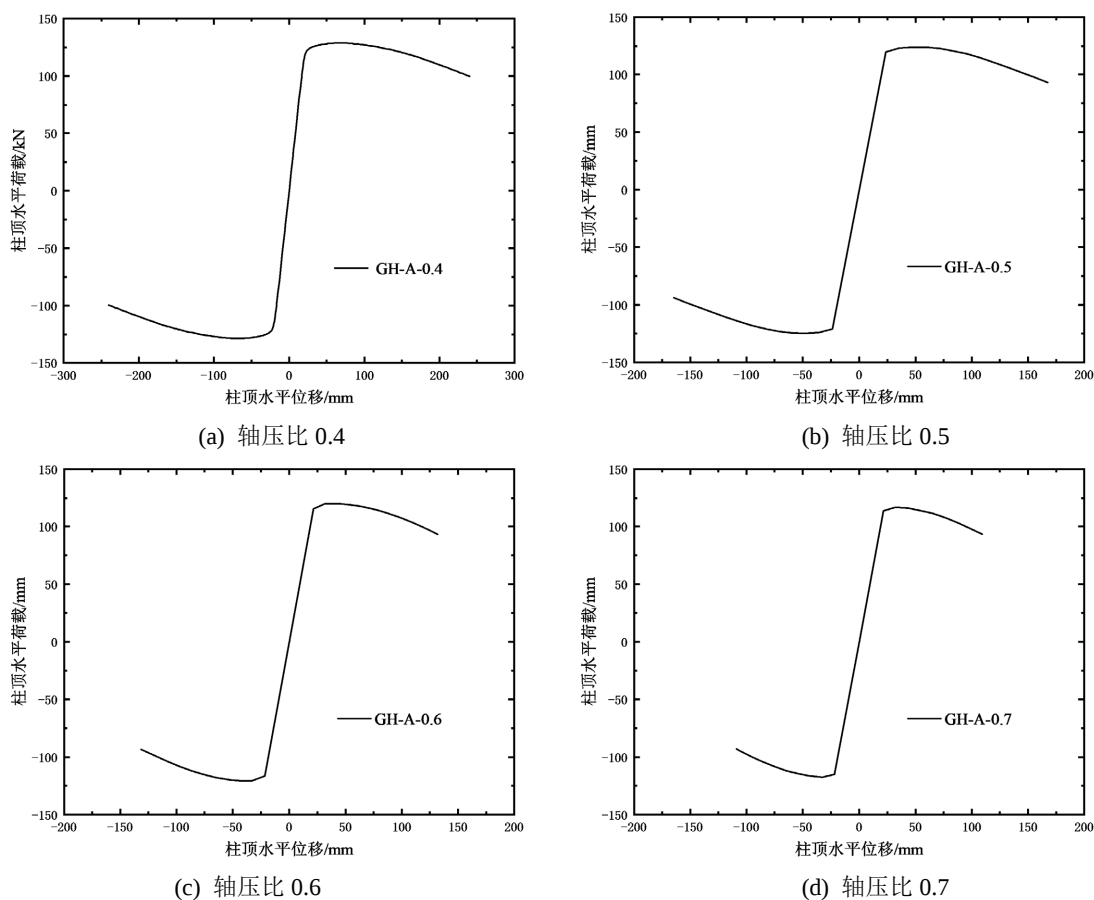


Figure 4. Skeleton curve

图 4. 骨架曲线图

由图可以得知,随着壁柱的轴压比逐渐增大,节点的平均的峰值荷载下降的比较多,节点的初始刚度也有所下降,但是下降的比较小,所以可得,轴压比的变化对于峰值荷载的影响比较大,单对于节点的初始刚度影响较小。由图可以得知,随着水平位移的逐渐加大,可以得知柱顶的水平荷载逐渐增大,屈服点和峰值点随着轴压比的变化而发生变化,而且节点的骨架曲线基本关于原点对称,根据曲线的发展状态可以将试件分为以下三种状态,弹性阶段,弹塑性阶段和破坏阶段,这说明节点在循环往复加载的力的作用下破坏模式较为稳定。

4.2. 滞回曲线

滞回曲线,别名是恢复力曲线,是在力循环往复作用下,得到结构的荷载-变形曲线。它反映结构在反复受力过程中的变形特征、刚度退化及能量消耗,是确定恢复力模型和进行非线性地震反应分析的依据。

在力循环往复作用下,得到结构的荷载-变形曲线。它反映结构在反复受力过程中的变形特征、刚度退化及能量消耗,是确定恢复力模型和进行非线性地震反应分析的依据。又称恢复力曲线(restoring force curve)。模拟结果如图 5 所示。

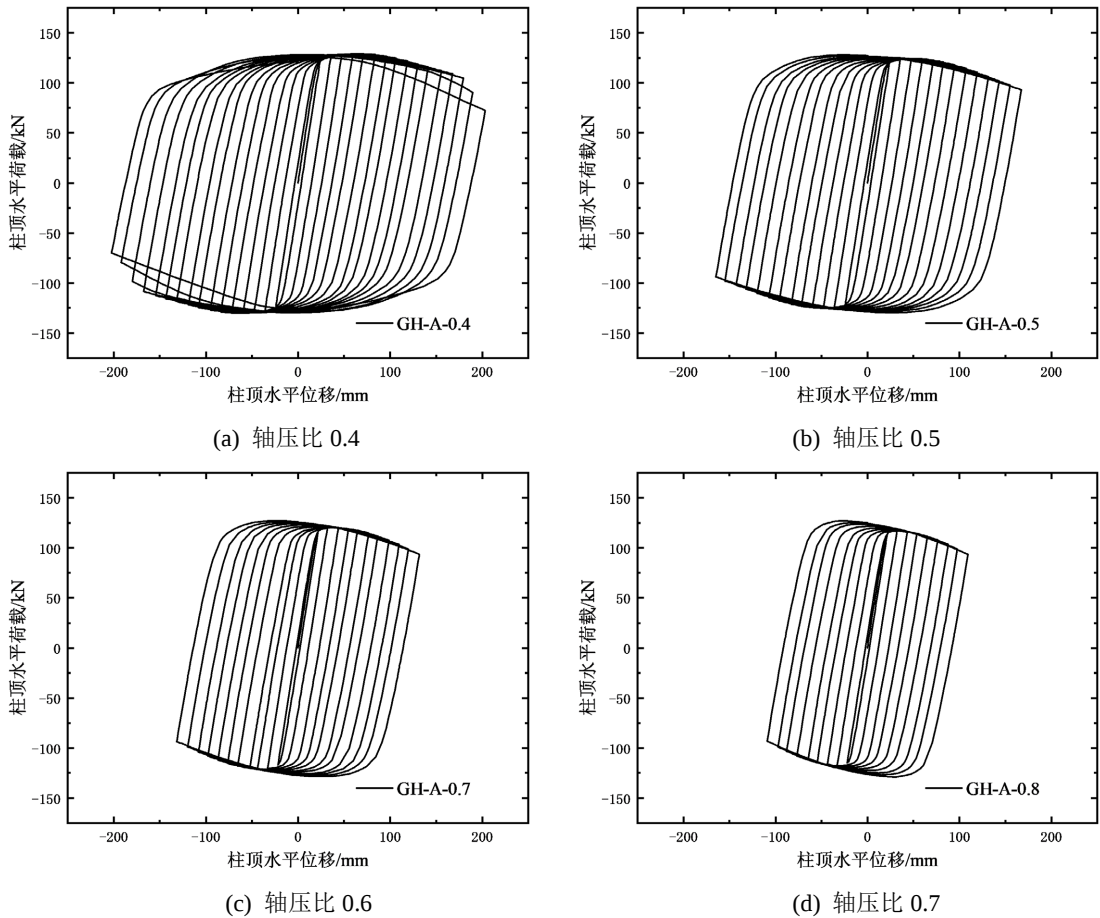


Figure 5. Hysteresis curve

图 5. 滞回曲线图

分析以上的滞回曲线可以得知:

在单次循环的荷载控制阶段,各试件滞回环均未明显张开,滞回曲线形状呈尖梭形,滞回环面积较小,试件基本处于弹性阶段。随着轴压比的增大,滞回环面积逐渐减小,本文中试件的钢梁端部与地梁之间设置刚性链杆,刚性链杆和梁端与地梁均采用铰轴连接,销轴和耳板圆孔的直径之间存在安装容差。在试件加载至水平位移接近零点的时候,两端刚性链杆需变形至销轴与圆孔一侧贴合消除容差后,才能发挥梁端下部的刚性链杆作用,从而使所有试件的滞回曲线均出现了微小的水平滑移段。所以在实验室所测得的数据要比有限元软件所得的数据更加准确,有限元所建立的模型往往不能模拟一些焊缝的发展还要在焊接的时候所残余的变形。

4.3. 破坏形态

图6为分别为单推试验和往复加载试验所得到的有限元破坏形态,应力最大部分主要在钢板和工字梁的结合面处,试件在柱翼缘侧均形成一个鼓曲半波,可以得知在实际的工程应用当中,节点的主要破坏发生在工字梁和钢板焊接处,图6显示工字梁端部分出现屈曲,钢梁应力随着距离节点的距离变大而减小。由云图分析可知力通过梁端翼缘与柱翼缘的焊缝,传递至节点核心区柱翼缘侧,在实际工程中应加强这部分构件的强度。

与有限元软件的分析做对比,实验室所得的滞回曲线没有ABAQUS的滞回曲线饱满,通过分析和参考以前的文献资源,主要有以下三点原因:①焊接过程中的残余应力;②边界约束的问题,有限元软件的边界约束过于理想化;③焊缝的质量问题,实验室的试件在工厂焊接的时候可能会有些许差错。以上四个试件都存在滑移现象,其主要的原因是边界约束问题。

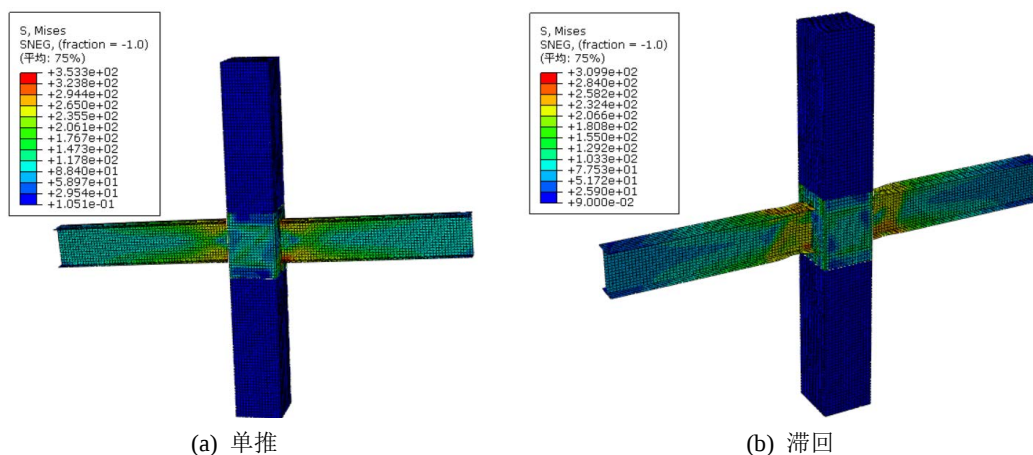


Figure 6. Stress nephogram
图6. 应力云图

5. 结论

- 1) 该节点具有良好的抗震性能,并且充分的发挥了混凝土和钢材的性能。
- 2) 随着轴压比的增大,节点的延性逐渐增大,但是在轴压比增大至0.6以后,节点的延性出现显著下降。
- 3) 节点的抗震性能随着轴压比的增大逐渐衰减,但耗能能力未发生太大变化。

参考文献

- [1] 聂建国, 樊健生. 广义组合结构及其发展展望[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(6): 1-8.

-
- [2] 周天华, 聂少锋, 卢林枫, 何保康. 带内隔板的方钢管混凝土柱-钢梁节点设计研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(5): 23-29, 39.
- [3] 吕西林, 李学平, 余勇. 方钢管混凝土柱与钢梁连接的设计方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(1): 1-5.
- [4] 聂建国, 秦凯, 肖岩. 方钢管混凝土柱节点的试验研究及非线性有限元分析[J]. 工程力学, 2006, 23(11): 99-109.
- [5] 刘晓刚, 樊健生, 陶慕轩, 等. 钢管混凝土柱-钢梁节点核心区受剪承载力计算对比研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 85-92, 118.
- [6] 秦希, 王伟. 隔板贯通式全螺栓节点抗连续性倒塌性能数值模拟分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(10): 68-75.
- [7] 赵宝成, 朱浩, 何若全, 等. 钢管混凝土柱与桁架穿芯螺栓端板式连接节点试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(2): 170-176.
- [8] Yuan, F., Huang, H. and Chen, M. (2019) Effect of Stiffeners on the Eccentric Compression Behaviour of Square Concrete-Filled Steel Tubular Columns. *Thin-Walled Structures*, 135, 196-209.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.11.015>
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 等. GB 50936-2014 钢管混凝土结构技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [10] Ramírez Ortiz, C., Gutierrez Amador, A.D. and Ramírez Duque, J.L. (2022) Numerical Analysis of the Seismic Behavior of a Steel Beam-To-Concrete-Filled Steel Tubular Column Connection Using External Diaphragms. *Buildings*, 12, Article 1217. <https://doi.org/10.3390/buildings12081217>
- [11] 中国建筑科学研究院, 中国地震局工程力学研究所, 中国建筑设计研究院, 等. GB/T50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] 钢结构设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [13] 王萌, 钱凤霞, 杨维国. 低屈服点 LYP160 钢材本构关系研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 55-62.
- [14] 吴世英, 廖兴祥, 董世民, 等. JGJ101-96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.