

螺栓连接方钢管混凝土柱-钢梁组合框架结构 拟静力有限元分析

罗 靛^{1,2}, 晏宇翔^{1,2}, 吕 辉^{1,2*}, 邵 炼^{1,2}

(1. 南昌航空大学 土木与交通学院, 南昌 330063; 2. 南昌航空大学 江西装配式建筑与智能建造重点实验室, 南昌 330063)

摘要: 本文应用ABAQUS软件建立了1层1跨螺栓连接方钢管混凝土柱-钢梁组合框架结构的三维精细有限元模型来进行拟静力分析, 螺栓、螺母等细小构件都采用实体建模。模型充分考虑了钢管对核心混凝土的约束作用、螺栓与螺母的预紧力作用以及螺栓与T形件、钢管、钢梁的摩擦接触作用, 模型分析的破坏形态、荷载-位移滞回曲线、刚度退化-位移曲线等计算结果与已有拟静力试验结果符合较好。在此基础上, 进一步分析了组合框架结构的螺栓滑移情况、柱轴压比、钢管横向变形系数、核心混凝土应力-应变曲线、结构损伤、塑性耗能分配机制。结果表明: 螺栓的滑移以及柱的轴压比都很小; 钢管底部测点的横向变形系数都超过0.5; 核心混凝土的压应力最大值超过轴心抗压强度, 此时钢管对核心混凝土产生套箍约束作用。地震往复作用使柱底的混凝土比梁柱节点处的混凝土更容易开裂和被压碎。该组合框架结构以梁耗能为主, 柱耗能为辅, 为典型的“强柱弱梁”结构体系。采用的螺栓实体建模方法具有计算精度高、求解效率快的特点, 能有效反映框架结构的破坏特征, 可适用于模拟实际的螺栓连接组合框架结构。

关键词: 钢-混凝土组合框架; 螺栓连接; 拟静力分析; 约束作用; 塑性耗能分配机制; 结构损伤; 强柱弱梁

中图分类号: TU398^{+.9}

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)10-0069-10

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240512002

Quasi Static Finite Element Analysis of Concrete-Filled Square Steel Tubular Column-Steel Beam Composite Frame Structure with Bolt Connections

LUO Liang^{1,2}, YAN Yuxiang^{1,2}, LYU Hui^{1,2*}, SHAO Lian^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Jiangxi Key Laboratory of Fabricated Building and Intelligent Construction, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

*Corresponding author: lvhui@nchu.edu.cn

Abstract: ABAQUS software was used to build a refined 3D solid finite element (FE) model and perform quasi static analysis of a 1-story, 1-span bolt connected square concrete-filled steel tubular (CFT) column-steel beam frame structure. Solid

收稿日期: 2024-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(52268031), 江西省智慧建筑工程研究中心开放基金(EZ202311419), 河南省科技攻关项目(252102240019)

作者简介:

罗 靛(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事组合结构抗震性能方面的研究。E-mail: luoliang@nchu.edu.cn。

晏宇翔(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢管混凝土力学性能方面的研究。

通信作者:

吕 辉(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事装配式建筑方面的研究。E-mail: lvhui@nchu.edu.cn。

modeling was used for small components such as screws and nuts. The model fully considers the confinement effect of the steel tube on the core concrete, the preload effect of screw and nut, and the frictional contact effect between bolts and T-shaped plate, steel tube and steel beam. The numerical results including failure mode, load-displacement hysteretic curve, stiffness degradation-displacement curve show good agreement with the existing quasi static experimental results. Based on this, further analysis was conducted on macro indicators such as slip of the bolt, axial compression ratio of column, lateral deformation index of steel tube and micro indicators such as stress-strain of core concrete, structural damage, plastic energy dissipation distribution mechanism. The results show that the slip of the bolt and the axial compression of the column are both very small. The lateral deformation index of the control points at the bottom of the steel tube exceeds 0.5, and the maximum compressive stress of the core concrete exceeds the uniaxial compressive strength. At this time, the steel tube exerts a confinement effect on the core concrete. The concrete at the bottom of the column is more prone to cracking and crushing than that at the beam column joints. This composite frame structure is dominated by beam energy dissipation and supplemented by column energy consumption, which is a typical "strong column weak beam" structural system. The bolt solid modeling method has the advantages of high calculation accuracy and solving efficiency and can effectively reflect the failure characteristics of the frame structure, so it can be conveniently used to simulate actual bolt connected composite frame structures.

Keywords: steel-concrete composite frame; bolted connection; quasi static analysis; confinement effect; plastic energy dissipation distribution mechanism; structural damage; strong column and weak beam

相比于传统的钢筋混凝土框架结构,钢-混凝土组合框架结构具有无需支模板、施工便捷、经济效益好等优势^[1-4],已被广泛应用于中国北京、上海、广州、天津等城市的多高层商务办公楼和住宅楼中。钢-混凝土组合框架结构通常由钢管混凝土柱与钢梁或钢-混凝土组合梁通过焊缝或者螺栓连接而成。其中,焊缝连接具有以下缺点:焊接的高温作用在焊缝附近形成热影响区,使钢材的金相组织发生变化,材质变脆;钢材受到不均匀的高温 and 冷却,产生残余应力和残余变形,影响结构的承载力、刚度和使用性能;另外,焊缝可能出现气孔、夹渣等缺陷,导致现场焊接的拼装定位较为繁琐。相比之下,螺栓连接无湿作业和高温作业等过程,且装拆方便、应用广泛,只需拧紧或松动螺母即可完成,符合装配式建筑的发展理念,顺应了我国建筑工业化的发展趋势。

为了推广螺栓连接钢-混凝土组合框架结构体系在高烈度地震区的应用,有必要对其抗震性能进行深入研究,常用的研究方法包括试验研究和数值模拟等。何文辉等^[5]对螺栓连接的2层1跨半钢管混凝土-组合梁平面框架结构进行拟动力、拟静力和推覆试验,研究了其破坏形态、位移响应、刚度退化、层间位移角。马尤苏夫等^[6]对螺栓连接的2层2跨钢管混凝土-钢梁框架结构进行拟静力试验,研究了其破坏机制、延性、刚度和耗能能力。王静峰等^[7-9]先后对螺栓连接的钢管混凝土组合梁框架结构、钢管混凝土-钢梁框架结构进行拟动力和拟静力试验,分析了结构的滞回性能、强度、刚度、延性和耗能能力等。徐红玉等^[10]对螺栓连接的钢管混凝土-钢梁框架结构进行拟动力和拟静力试验,分析了其承载能力、刚度退化、延性和耗能能力。宗周红等^[11]对螺栓连接的2层2跨钢管混凝土-组合梁框架结构进行拟动力、拟静力和静载破坏试验,

研究了结构的动力响应、恢复力特性和耗能性能,并应用PC-Newmark法编写程序计算位移、加速度,采用刚性节点假定,忽略梁柱节点的半刚性特征,且未考虑往复作用下混凝土的损伤特征和钢材的强化特征。

本文在对钢管混凝土柱拟静力试验^[12]和钢管混凝土柱-组合梁空间框架结构拟动力试验^[13]进行合理模拟的基础上,进一步对螺栓连接钢管混凝土柱-钢梁组合框架结构拟静力试验进行模拟,探究该框架结构的螺栓滑移情况、柱轴压比、钢管横向变形系数、混凝土应力-应变发展情况、结构损伤、塑性耗能能力等。

1 有限元模型与试验验证

1.1 试验简介

以徐红玉等^[10]完成的1榀螺栓连接方钢管混凝土柱-钢梁组合框架为原型,对其进行拟静力分析。框架由2根竖向方钢管混凝土柱和1根水平钢梁通过4个T形件、32个10.9级M16高强螺栓连接组成。框架尺寸和各构件截面尺寸如图1所示。框架的层高为1800mm,钢管混凝土柱高出梁430mm,水平柱距3500mm。方钢管的边长200mm,钢管壁厚10mm。钢梁为H型钢,截面尺寸为250mm×125mm×6mm×9mm。T形件的截面尺寸为210mm×170mm×9mm×14mm。混凝土强度等级为C30,立方体抗压强度实测值 f_{cu} 为36.3MPa。柱、梁和T形件均采用Q235钢,具体材料属性见表1,其中 t 为钢材厚度, φ 为螺栓的直径, E_s 为弹性模量, f_y 为实测屈服强度。

1.2 有限元建模方法

1.2.1 本构关系

核心混凝土采用丁发兴等^[14-15]提出的塑性损伤本构

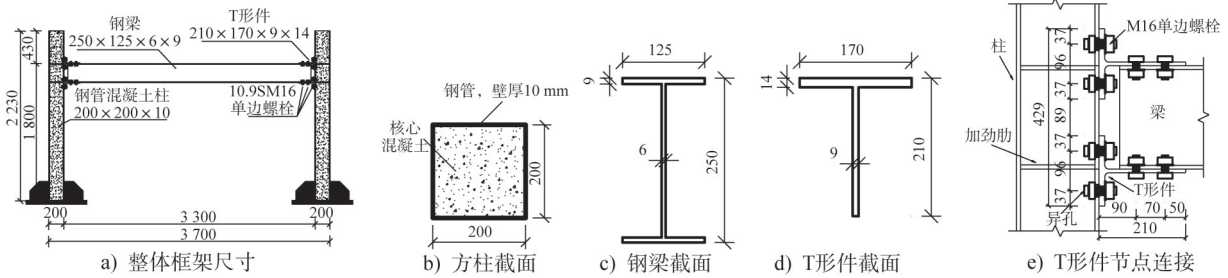


图1 螺栓连接组合框架结构的示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of composite frame structure with bolt connections (unit: mm)

表1 钢材材料性能

Table 1 Material properties of steel

序号	钢材	厚度 t/mm	直径 φ/mm	弹性模量 $E_s/\times 10^5 MPa$	屈服强度 f_y/MPa	屈服应变 $\times 10^{-6}$
1	钢管	10	—	2.09	328	1 569
2	钢梁腹板	6	—	1.96	280	1 429
3	钢梁翼缘	9	—	1.99	252	1 266
4	T形件腹板	9	—	2.07	306	1 478
5	T形件翼缘	14	—	1.97	269	1 365
6	螺栓 10.9级 M16	—	16	2.06	900	4 369

模型,基本参数和应力-应变骨架曲线见文献[14],损伤变量见文献[15]。如图2所示,混凝土在单轴应力作用下产生一定的变形,此时混凝土具有的应变能为 W ,当完全卸载后,其不可逆变形是由于能量的耗散引起的,此时耗散能为 W_1 ,混凝土损伤引起能量的耗散导致刚度降低,在ABAQUS中,混凝土在卸载时的卸载刚度定义为 $(1-D_1)E_c$, E_c 为混凝土弹性模量, D_1 定义为弹性模量损伤变量, f 为混凝土单轴受力强度。按照能量损伤定义,损伤变量也可定义为:

$$1 - D_2 = \frac{W_c}{W} \quad (1)$$

式中: $W = \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon$, $W_c = \sigma^2 / [2(1 - D_1)E_c]$, W_e 为可恢复的弹性应变能, D_2 定义为能量损伤变量。如认为弹性模量损伤和能量的损失存在如下关系,即:

$$1 - D_1 = (1 - D_2)^n \quad (2)$$

由式(1)和式(2),得到基于弹性模量损伤的损伤变量表达式:

$$D_1 = 1 - \left(\frac{\sigma^2}{2E_c W} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (3)$$

根据对循环荷载下混凝土单轴拉、压卸载刚度的分析结果,当采用以下计算公式时,可使损伤变量计算结果与试验结果吻合较好:

$$n = \frac{1 + 0.05x^4}{3 + 0.05x^4} \quad (4)$$

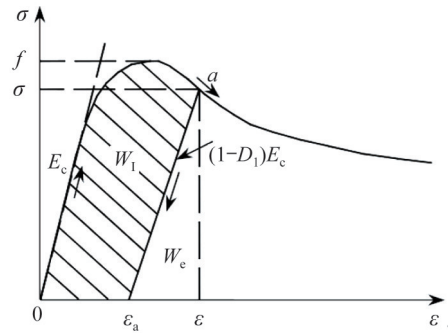


图2 混凝土单轴受力损伤变量计算简图

Fig. 2 Calculation diagram of concrete uniaxial stress damage variable

式中: $x = \epsilon/\epsilon_0$, ϵ_0 为混凝土拉、压峰值应变。受压刚度复原因子 W_c 取 0.8, 受拉刚度复原因子 W_l 取 0.2。图3、图4分别为混凝土的应力-应变曲线、损伤-应变曲线。

钢管、钢梁、T形件和螺栓的本构关系采用丁发兴等^[15]提出的ABAQUS中6个参数表示的弹塑性混合强化模型,以反映钢材的屈服面及包辛格效应。螺栓的随动硬化参数 C_1 取 7 500。考虑到钢管、钢梁、T形件容易屈曲导致硬化特征变得不明显,故随动硬化参数 C_1 取 750。

1.2.2 界面模拟与网格划分

钢管与核心混凝土之间设置库伦摩擦型接触,由切线方向的黏结滑移和法线方向的硬接触构成。切线方向

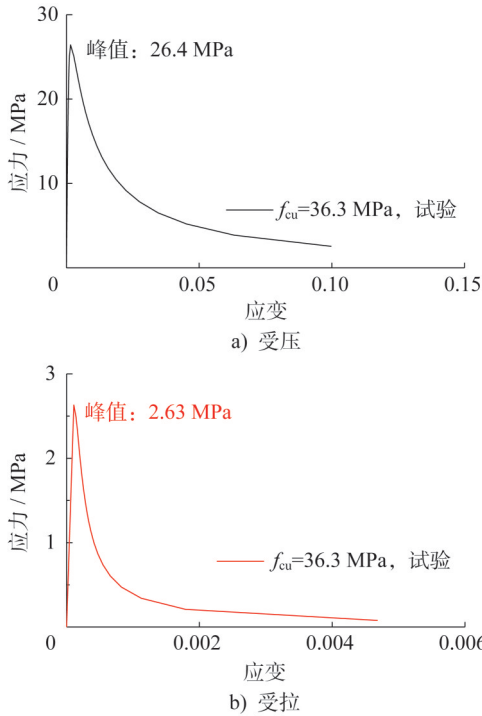


图3 核心混凝土的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of the core concrete

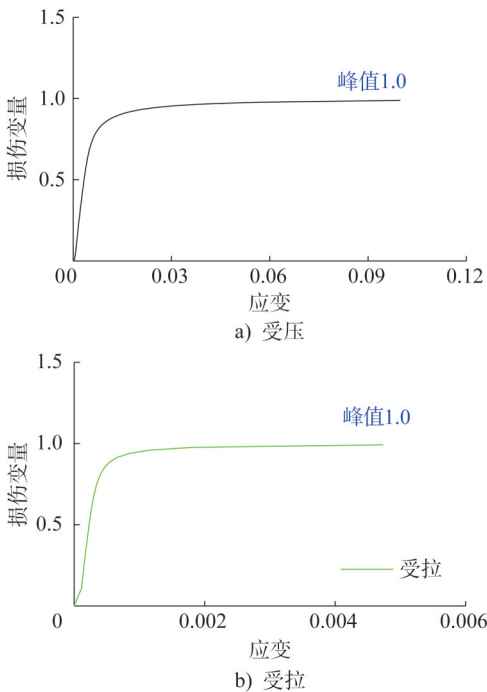


图4 核心混凝土的损伤变量-应变曲线

Fig. 4 Damage-strain curves of the core concrete

的接触为罚函数,摩擦系数取0.5。钢管与钢梁通过T形件和10.9级M16螺栓连接,设置相应的绑定约束(Tie)、摩擦相互作用(钢与钢之间的摩擦系数取0.3)和预紧力(100 kN,沿螺栓杆轴传递)。作动器通过水平加载板与钢管的1层顶部连接,故将水平加载板与钢管也采用绑

定约束(Tie),主表面为水平加载板,从表面为钢管。钢管、混凝土、钢梁、T形件、螺栓、螺母、水平加载板都采用实体单元C3D8R模拟,单元形状为六面体,采用结构化网格。钢管、核心混凝土、钢梁、水平加载板的网格尺寸为50 mm。T形件的尺寸较小,网格尺寸取30 mm,螺栓和螺母是细小部件,网格尺寸取6 mm。有限元模型如图5所示。

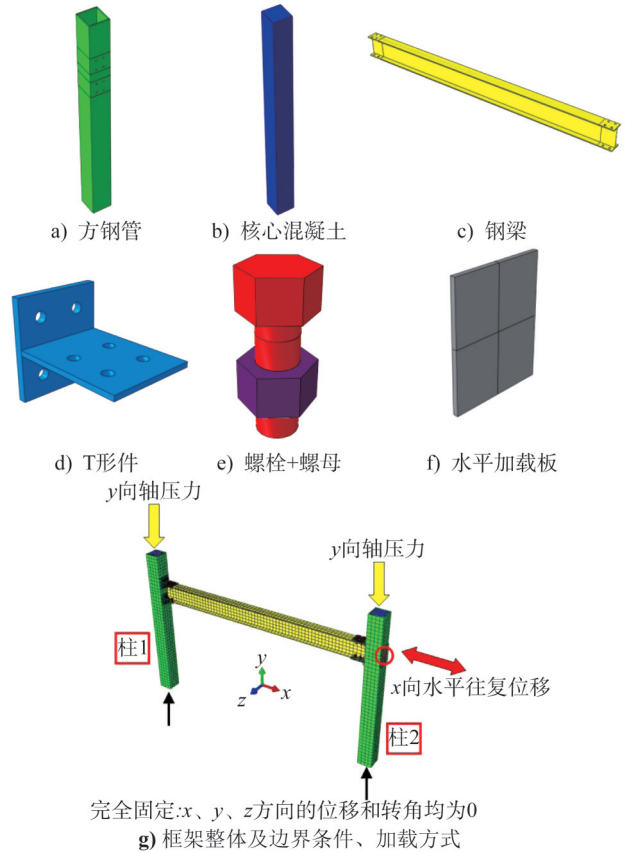


图5 螺栓连接组合框架结构的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of composite frame structure with bolt connections

1.2.3 边界条件与加载模式

有限元模型采用与拟静力试验^[10]一致的边界条件,试验中钢管混凝土柱通过地锚螺栓固定在刚性地面上,故建模时对柱底采用完全固定约束, x 、 y 、 z 三个方向的位移和转角均设置为0。采用与试验一致的加载方式,共设置2个分析步:(1)第1个分析步,将恒定轴压力以压强(轴压力/柱截面面积= $500\text{ kN}/40\,000\text{ mm}^2=12.5\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$)的形式施加在2根柱的顶部表面,时长1 s,并持续加载到第2个分析步;(2)第2个分析步,对水平加载板的中点施加水平往复位移,自屈服位移 Δ_y (13.3 mm)开始,以该屈服位移的整数倍作为级差递增加载,即 $\Delta_y=13.3\text{ mm}$ 、 $2\Delta_y=26.6\text{ mm}$ 、 $3\Delta_y=39.9\text{ mm}$ 、 $4\Delta_y=53.2\text{ mm}$ 、

$5\Delta_y=66.5\text{ mm}$ 每级循环3次,如图6所示,加载至61 s结束,边界条件与加载方式见图5g)。以0.2 s为步长,共305个计算点,计算机运行0.5小时后完成分析,且计算结果收敛,表明采用的建模方法具有求解效率高、数值稳定性好的特点。最大水平位移为 $5\Delta_y$,此时的位移云图见图7。

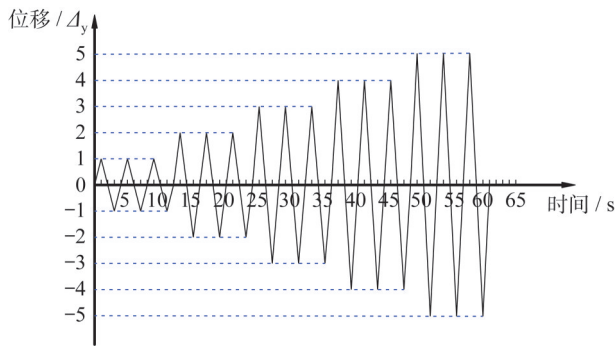


图6 加载制度
Fig. 6 Loading system

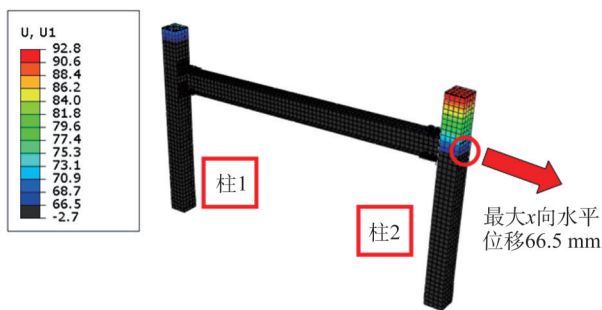


图7 最大水平位移云图(单位:mm)

Fig. 7 Contour of maximum horizontal displacement (unit:mm)

1.3 试验验证

1.3.1 破坏形态

有限元分析得到论文[10]中组合框架的钢材最终破坏形态与拟静力试验对比如图8所示,由图可知:

(1) 柱底钢管的最大拉应力、最大压应力分别为359.4 MPa、363.8 MPa,都大于屈服强度328 MPa,这与试验现象“柱底钢管明显鼓曲”吻合;钢梁端部翼缘的最大压应力为304.2 MPa,位于螺栓孔附近,明显大于屈服强度252 MPa,与试验现象“梁翼缘出现屈曲乃至鼓曲,塑性变形明显加剧”吻合;T形件的最大压应力为332.3 MPa,大于屈服强度306 MPa,已发生屈服,与试验现象“T形件的腹板出现明显弯曲”吻合。螺栓的最大拉应力、最大压应力分别为769.1 MPa、796.4 MPa,都小于屈服强度900 MPa,与试验现象“螺栓均未达到屈服应变”一致;

(2) 柱的最大应力超出屈服强度10.9%,梁的最大应力超出屈服强度20.7%,这表明梁屈服后强化更明显,与试验现象“加载中期,与T形件腹板连接的梁端出现塑性铰并逐渐向周围发展;加载后期,柱钢管开始屈服和核心混凝土被压溃产生塑性铰,梁先于柱出现塑性铰”吻合,该框架符合“强柱弱梁”设计准则。

综上所述,有限元模型可准确模拟拟静力试验中螺栓连接钢管混凝土柱-组合梁框架结构的破坏形态。

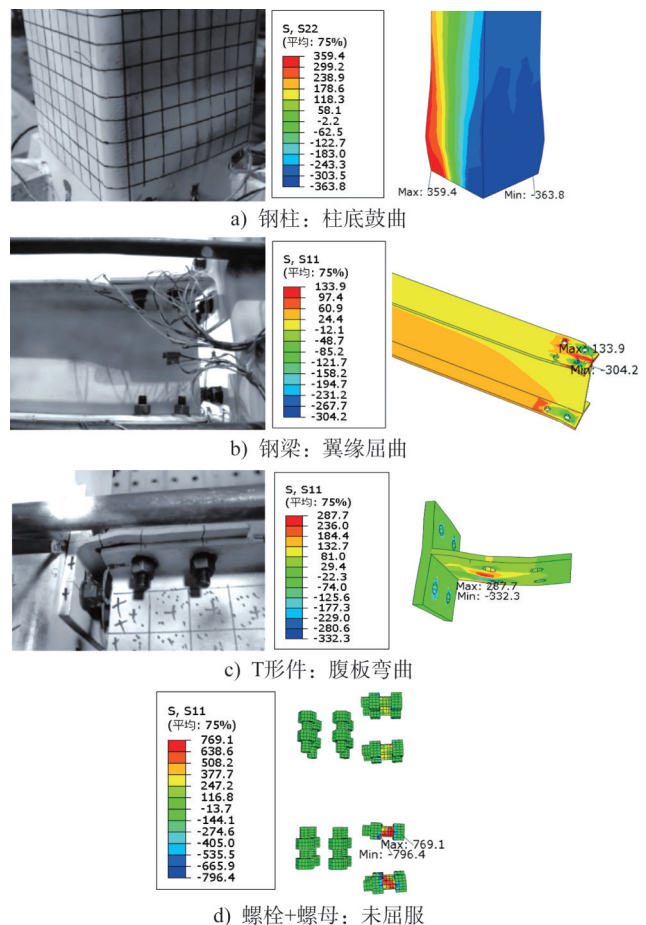


图8 组合框架的破坏形态及钢材应力(单位:MPa)
Fig. 8 Failure modes and stress of steel of composite frame (unit:MPa)

1.3.2 曲线结果对比

有限元模拟计算结果和试验结果的多种曲线对比如图9所示,由图可知:有限元模拟的荷载-位移滞回曲线比试验曲线略饱满,这是因为核心混凝土的本构模型没有考虑结构在水平往复过程中混凝土开裂与闭合的交替变化。但两者的变化趋势一致,且有限元模拟的荷载-位移骨架曲线、刚度退化-位移曲线与试验曲线都吻合较好,表明建立的有限元模型具有较高的精度,可准确地模拟螺栓连接组合框架结构的拟静力性能。

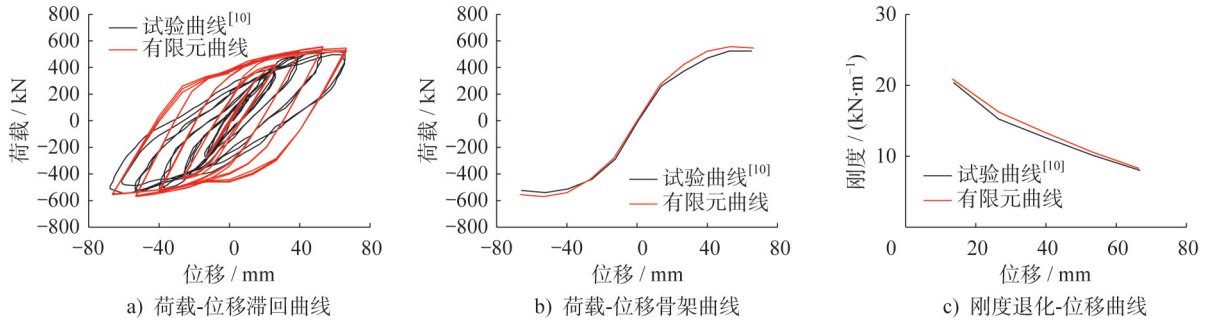


图9 有限元分析与试验结果对比

Fig. 9 Comparison of results between FEA and test

2 指标分析

2.1 螺栓的滑移

为了分析水平往复荷载作用下螺栓的螺杆与螺母之间的滑移(两者沿杆轴的位移差),标出与柱、梁连接的各4个螺栓的序号,见图10。对于柱,螺杆与螺母的滑移为两者水平位移 U_1 的差值;对于梁,螺杆与螺母的滑移为两者竖向位移 U_2 的差值。与柱、梁连接的各4个螺栓的滑移时程曲线如图11所示,由图可知:

(1) 各曲线均呈波动趋势,柱螺栓的滑移最大值为0.25 mm,梁螺栓的滑移最大值仅为0.15 mm,都很小,表明螺杆与螺母之间没有明显错动;

(2) 从上往下,柱螺栓的滑移略微增大,即柱螺栓4的滑移>柱螺栓3的滑移>柱螺栓2的滑移>柱螺栓1的滑移,梁下翼缘螺栓3、螺栓4的滑移明显大于上翼缘螺栓1、螺栓2的滑移。

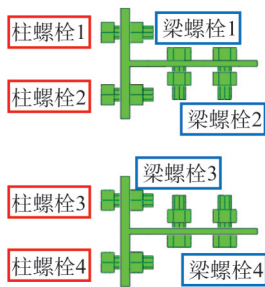


图10 与柱、梁连接的各4个螺栓

Fig. 10 Four bolts connected to columns and beams

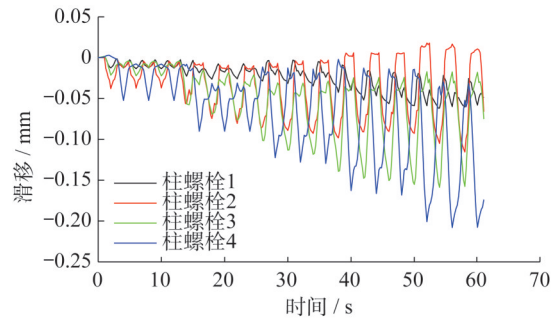
2.2 柱的轴压比

柱轴压比的表达式为:

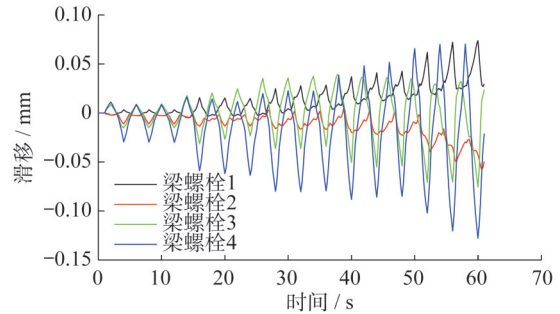
$$n = \frac{N}{N_0} = \frac{N}{f_y A_s + f_c A_c} \quad (2)$$

式中: n 为轴压比; N 、 N_0 分别为钢管混凝土柱的轴向力(y 向)和名义受压承载力,经计算 $N_0=3\ 348.8\text{ kN}$; A_s 、 A_c 为钢管、核心混凝土的截面面积。

柱1、柱2的轴压比时程曲线见图12,由图可知:



a) 与柱连接的4个螺栓滑移



b) 与梁连接的4个螺栓滑移

图11 螺栓的滑移时程曲线

Fig. 11 Slippage time-history curves of bolts

(1) 由于有限元分析中轴压力加载的设定时间为1 s,见1.2.3节,故两根柱的轴压比在1 s后达到0.15,之后在0.15左右波动,数值较小;

(2) 两根柱的轴压比变化为“互补”趋势,波峰对应波谷交替出现,这是由低周往复荷载作用引起的相位上的差异。

2.3 钢管的横向变形系数

水平往复荷载作用下柱底钢管发生屈曲,柱底钢管4个应变测点的位置见图13,其中1、3为侧面测点,2、4为正面测点。由于点1和点3关于加载方向对称,故这2点的应变发展相同,因此着重分析点1、2、4的应变。钢管横向变形系数定义为测点处钢管环向应变与轴向应变比值的绝对值^[16-20],柱1、柱2的测点1、2、4的横向变形系数时程曲线如图14所示,由图可知:

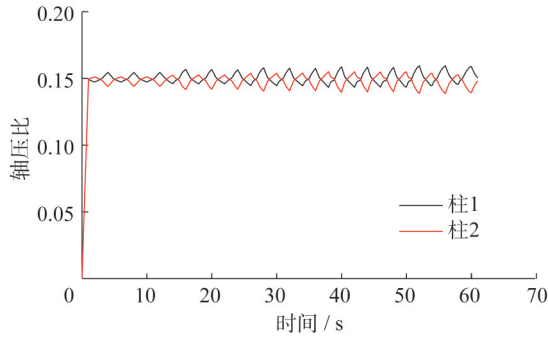


图 12 两根柱的轴压比时程曲线

Fig. 12 Axial compression ratio time-history curves of columns

(1) 各曲线均为震荡趋势,点1、2、4的横向变形系数都超过 0.5,此时钢管对核心混凝土产生套箍约束作用^[16-20];

(2) 侧面测点1的横向变形系数在后期稳定在 0.5,且最大值小于正面测点2、4,表明水平往复荷载使测点2、4处的钢管对核心混凝土的套箍约束作用更明显。

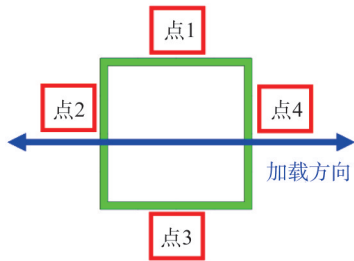


图 13 钢管柱底部的应变测点

Fig. 13 Strain measurement points at the bottom of steel tubular column

2.4 核心混凝土应力-应变

柱底下边缘核心混凝土的纵向应力-应变滞回曲线如图 15 所示,由图可知:核心混凝土的纵向应力已超过轴心抗压强度 f_c (26.4 MPa),峰值达到 35.7 MPa,表明钢管对核心混凝土产生套箍约束作用,使得混凝土强度提高,这与 2.3 节中的结论一致。

2.5 结构损伤

由于混凝土本构关系中定义了损伤变量计算值,故核心混凝土存在损伤。图 16、图 17 分别为加载结束时核心混凝土受压损伤指数、受拉损伤指数的云图和时程曲线,由图可知:

(1) 加载结束后,核心混凝土的受拉损伤指数、受压损伤指数分别达到 0.992、0.976,接近 1.0,核心混凝土已发生开裂和压碎现象;

(2) 核心混凝土的开裂区域主要集中在柱底和与梁

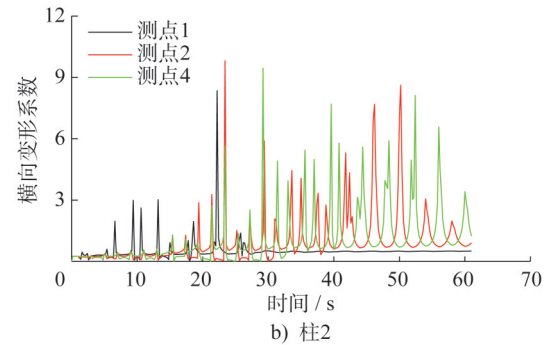
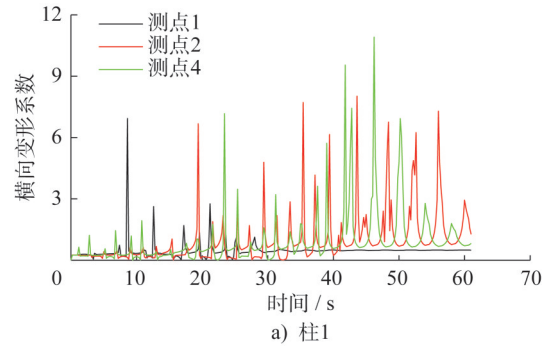


图 14 应变测点处的横向变形系数时程曲线

Fig. 14 Time-history curves of horizontal deformation coefficient at strain measurement points

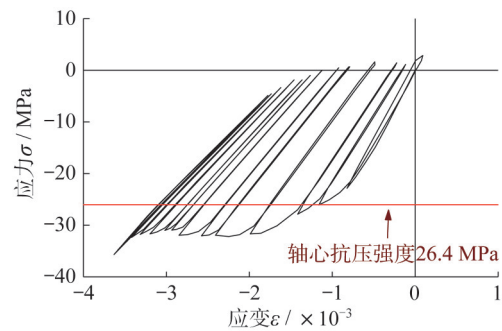


图 15 柱底核心混凝土测点的应力-应变曲线

Fig. 15 Stress-strain curve at the measurement point of concrete

连接处,柱底混凝土在 3.4 s 开裂,受拉损伤指数发生突变,与梁连接处混凝土在 43 s 开裂,受拉损伤指数为逐渐递增趋势,表明往复荷载作用下柱底混凝土先开裂;

(3) 核心混凝土的受压损伤指数在柱底区域达到 0.976,而与梁连接处核心混凝土的受压损伤指数仅为 0.049,表明地震往复作用使柱底混凝土更容易被压碎。

2.6 塑性耗能

该组合框架结构受到轴压力和水平力共同作用时,在对应受力方向发生位移,进而发生可恢复的弹性耗能与不可恢复的塑性耗能。以塑性耗能对组合框架结构进行耗能分析更直观。框架整体的塑性耗能包括核心混凝土和多种钢材(钢管、钢梁、T形件、螺栓)的塑性耗能。

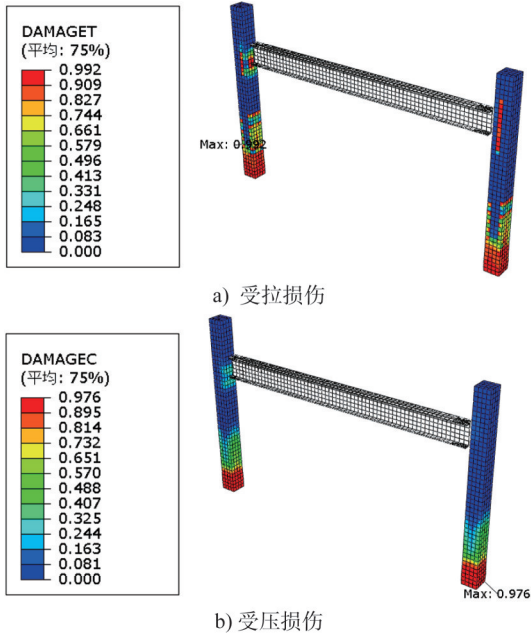


图 16 加载结束后核心混凝土的损伤指数云图

Fig. 16 Contour of damage index of the core concrete after loading

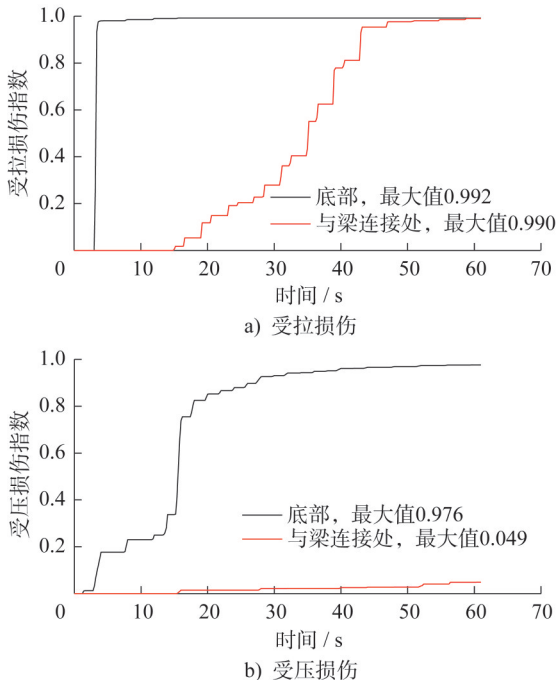


图 17 核心混凝土的损伤指数时程曲线

Fig. 17 Time-history curves of damage index of the core concrete

从有限元结果中提取框架各构件的塑性耗能占比和塑性耗能时程曲线,如图 18 所示,由图可知:

- (1) 塑性耗能不可逆,随时间呈累积增加趋势,20 s 之前增长较慢,后期增长较快;
- (2) T 形件已屈服进入塑性阶段进而产生塑性耗能,

但由于数量少、体积小,塑性耗能仅为 2.7 kJ,且占比很小。螺栓各处的应变都小于屈服应变,螺栓未发生屈服,始终处于弹性阶段,没有产生塑性耗能。因此重点考虑钢管混凝土柱和钢梁的塑性耗能特征;

(3) 柱(钢管+核心混凝土)的塑性耗能占比为 40.7%,而钢梁的塑性耗能占比达到 58.5%,表明该框架以梁耗能为主,柱耗能为辅,为典型的“强柱弱梁”框架结构体系,这与试验现象“当位移加载至 $4\Delta_y=53.2$ mm 时,梁翼缘先出现屈服并进入塑性阶段;当位移加载至 $5\Delta_y=66.5$ mm 时,梁翼缘的塑性变形明显加剧,右柱柱脚钢管明显鼓曲,且出现裂纹;当位移加载至 $5\Delta_y$ 的第 3 圈时,柱脚断裂,柱内核心混凝土有少量剥落”情况一致,即梁的破坏程度更严重,而柱的破坏程度较轻。

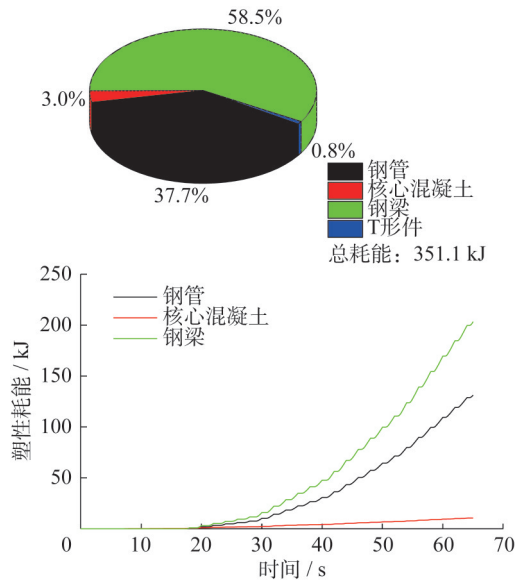


图 18 各构件的塑性耗能占比及时程曲线

Fig. 18 Plastic energy dissipation of components and time-history curves

3 结论

本文采用 ABAQUS 软件建立 1 层 1 跨螺栓连接方钢管混凝土柱-钢梁框架结构的三维实体精细化有限元模型并进行拟静力分析,螺栓、螺母等细小构件都采用实体建模,模型考虑了钢管对核心混凝土的约束作用、螺杆与螺母的预紧力作用以及螺栓与 T 形件、钢管、钢梁的摩擦接触作用,得到以下结论:

- (1) 计算得到结构的破坏形态、荷载-位移滞回曲线、荷载-位移骨架曲线以及刚度退化-位移曲线与试验结果吻合较好,表明模型的精度较高,建模方法合理可靠。
- (2) 与柱、梁连接的螺栓的滑移都很小,表明螺杆与螺母之间没有明显错动;低周往复荷载作用使得两根柱的轴压比呈“互补”趋势,波峰对应波谷交替出现,且轴压

比较小,仅为0.15;柱底钢管的4个应变测点的横向变形系数都超过0.5,核心混凝土的纵向应力已超过轴心抗压强度 f_c (26.4 MPa),表明钢管对核心混凝土产生套箍约束作用,使得混凝土强度提高;加载结束时,核心混凝土的受拉损伤指数、受压损伤指数都接近1.0,核心混凝土已发生开裂和压碎现象,且柱底混凝土比梁柱节点处混凝土更容易开裂和压碎;该框架以梁耗能为主,柱耗能为辅,属于典型的“强柱弱梁”框架结构体系。

(3) 采用的精细化有限元建模方法具有求解速度快,稳定性好的特点,能较好地模拟螺栓连接钢-混凝土组合框架结构的拟静力性能,可为后续结构的设计、施工和加固提供参考。

参考文献:

- [1] 丁发兴,许云龙,王莉萍,等.拉筋对两层两跨钢-混凝土组合框架结构抗震性能的影响[J].工程力学,2023,40(4):58-70.DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2021.09.0693.
DING Faxing, XU Yunlong, WANG Liping, et al. Pseudo-static tests of stirrup-confined square CFST two-story two-span composite frame structure [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(4): 58-70. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.09.0693. (in Chinese)
- [2] 丁发兴,许云龙,王莉萍,等.钢-混凝土组合结构抗震性能研究进展[J].钢结构(中英文),2023,38(12):1-26. DOI: 10.13206/j.gjgS23062902.
DING Faxing, XU Yunlong, WANG Liping, et al. State of art and future insights of the seismic performance of steel-concrete composite structures [J]. Steel Construction (Chinese & English), 2023, 38(12): 1-26. DOI: 10.13206/j.gjgS23062902. (in Chinese)
- [3] 许成祥,张娟婷,刘晓强,等.方钢管混凝土柱-不等高钢梁组合框架结构受力性能有限元分析[J].武汉科技大学学报,2022,45(3):223-231.
XU Chengxiang, ZHANG Juanting, LIU Xiaoqiang, et al. Finite element analysis of mechanical performance of composite frame structure with concrete-filled square steel tubular column and unequal height steel beam [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2022, 45(3): 223-231. (in Chinese)
- [4] 杨涛,黄俊人,张云,等.装配式钢-混凝土组合框架动态倒塌性能研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(5):86-95.
YANG Tao, HUANG Junren, ZHANG Yun, et al. Study on dynamic collapse performance of prefabricated steel-concrete composite frame structures [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(5): 86-95. (in Chinese)
- [5] 何文辉,范云蕾,肖岩,等.高强螺栓端板连接钢梁-方钢管混凝土框架结构抗震性能研究[J].建筑结构学报,2009,30(4):18-29. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2009.04.008.
HE Wenhui, FAN Yunlei, XIAO Yan, et al. Seismic behaviors of high-strength bolted end-plate connected composite steel beam and square concrete filled steel tube column frames [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4): 18-29. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.04.008. (in Chinese)
- [6] 马尤苏夫,王先铁,周清汉,等.穿芯高强螺栓-端板节点方钢管混凝土框架抗震性能数值分析[J].工程力学,2015,32(2):154-162. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2013.09.0815.
MA Yousufu, WANG Xiantie, ZHOU Qinghan, et al. Numerical analysis of the seismic behavior of a square concrete-filled steel tube frame with through bolt-end plate joints [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 154-162. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.09.0815. (in Chinese)
- [7] 王静峰,潘学蓓,彭啸,等.两层钢管混凝土柱与组合梁单边螺栓端板连接框架拟动力试验研究[J].土木工程学报,2016,49(10):32-40. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2016.10.006.
WANG Jingfeng, PAN Xuebei, PENG Xiao, et al. Pseudo-dynamic tests on blind bolted end plate connected frames between two-layer CFST columns and composite beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 32-40. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.10.006. (in Chinese)
- [8] 王静峰,王海涛,王冬花,等.钢管混凝土柱-钢梁单边高强螺栓端板连接框架的拟静力试验研究[J].土木工程学报,2017,50(4):13-20,31. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2017.04.002.
WANG Jingfeng, WANG Haitao, WANG Donghua, et al. Experimental study on CFST column-to-steel beam frames with high-strength blind-bolted endplate connections under pseudo-static loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 13-20, 31. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.04.002. (in Chinese)
- [9] 王静峰,彭啸,潘学蓓,等.钢管混凝土柱与钢梁单边高强螺栓端板连接框架拟动力试验[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(5):1016-1026. DOI:10.16058/j.issn.1005-0930.2018.05.009.
WANG Jingfeng, PENG Xiao, PAN Xuebei, et al. Pseudo-dynamic testing of CFST column-to-steel beam frames with high-strength blind-bolted endplate connections [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(5): 1016-1026. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2018.05.009. (in Chinese)
- [10] 徐红玉,李奕昂,王新武,等.T型件单边螺栓连接方钢管混凝土柱-钢梁框架抗震性能研究[J].工程抗震与加固改造,2023,45(3):15-22. DOI:10.16226/j.issn.1002-8412.2023.03.003.
XU Hongyu, LI Yiang, WANG Xinwu, et al. Study on seismic behavior of concrete-filled square steel tubular column steel beam frame with T-shaped unilateral bolt connections [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2023, 45(3): 15-22. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2023.03.003. (in Chinese)
- [11] 宗周红,林东欣,房贞政,等.两层钢管混凝土组合框架结构

