

# 考虑球冠形脱空影响的圆钢管混凝土柱 抗侧向冲击性能分析

朱维军<sup>1</sup>, 沈奇罕<sup>1,2,3\*</sup>, 王静峰<sup>1,3</sup>, 胡子明<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 水泥基材料低碳技术与装备教育部工程研究中心, 合肥 230009; 3. 合肥工业大学 先进钢结构技术与产业化安徽省协同创新中心, 合肥 230009)

**摘要:** 近年来, 钢管混凝土作为城市高架、跨河桥梁的墩柱, 常受到车辆、船舶等机械冲击灾害的影响, 这是导致其结构损伤、破坏甚至严重倒塌的最主要原因之一。而实际中钢管混凝土结构由于材料、施工、环境等因素影响, 普遍存在脱空缺陷问题, 但目前尚缺乏关于带脱空缺陷钢管混凝土抗侧向冲击性能的研究报道。为此, 建立了考虑球冠形脱空特征的圆钢管混凝土柱抗侧向冲击有限元分析模型, 系统分析了脱空率、脱空方位、冲击速度、冲击质量、边界条件、轴压比、径厚比等参数对冲击力(包括峰值 $F_m$ 和等效值 $F_{eq}$ )、挠度变形(包括最大值 $\delta_m$ 和残余值 $\delta_r$ )与能量吸收( $E_a$ )的影响规律, 揭示了侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的典型破坏模式, 明确了在侧向冲击全过程下考虑脱空影响的冲击时程特征曲线、冲击力全过程扩散机理、钢-混凝土接触行为。结果表明, 带球冠形脱空缺陷的圆钢管混凝土柱在侧向冲击作用下的破坏模式仍表现为整体挠度变形, 但其钢管局部凹陷程度与脱空率呈正相关。随着脱空率的增大, 构件的 $F_{eq}$ 、 $F_m$ 和 $E_a$ 逐渐减小, 但 $\delta_m$ 和 $\delta_r$ 逐渐增大。

**关键词:** 脱空缺陷; 钢管混凝土; 侧向冲击; 有限元分析; 破坏模式

中图分类号: TU398<sup>+.9</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0021-13

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230918001

## Impact Behavior of Circular CFST Columns Considering the Influence of Spherical-Cap Gap

ZHU Weijun<sup>1</sup>, SHEN Qihan<sup>1,2,3\*</sup>, WANG Jingfeng<sup>1,3</sup>, HU Ziming<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Engineering Research Center of Low-Carbon Technology and Equipment for Cement-Based Materials, Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Collaborative Innovation Center for Advanced Steel Structure Technology and Industrialization, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

\*Corresponding author: QihanShen667@hfut.edu.cn

**Abstract:** Vehicle and ship impact accidents acting on the concrete-filled steel tubular (CFST) piers of city viaducts and river-crossing bridges occur frequently in recent years, and have become one of the most important factors that lead to the damage, destruction and collapse of structures. Nonetheless, the concrete gap imperfection is observed to commonly exist in CFST engineering practices, due to disadvantageous factors in material properties, construction and

收稿日期: 2023-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(52108129), 博士后面上项目(2022M713388), 中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2023HG TB0260)

作者简介:

朱维军(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢结构与组合结构方面的研究。E-mail: 2013008460@qq.com。

通信作者:

沈奇罕(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事钢结构与组合结构方面的研究。E-mail: QihanShen667@hfut.edu.cn。

environment. While present researches are scarcely focused on the lateral impact behavior of CFST members with concrete gap imperfections. This paper established a finite element (FE) model of circular CFST column under lateral impact considering the feature of the spherical-cap gap. The influence of gap ratio, gap position, impact velocity, impact mass, boundary condition, axial compression ratio, radius-to-thickness ratio, etc. on the impact force (including the maximum  $F_m$  and equivalent  $F_{eq}$  values), the flexural deflection (including the maximum  $\delta_m$  and residual  $\delta_r$  values) and the energy dissipation  $E_a$  was investigated systematically. The typical failure modes of the circular CFST column with spherical-cap gap under lateral impact was revealed, and the featured time-history curves, force spread mechanism, steel-concrete contact behavior of the circular CFST column with spherical-cap gap under the full-range lateral impact were respectively obtained, which had considered the effect of gap imperfection. The results show that the failure mode of the circular CFST column with spherical-cap gap under lateral impact still displays as the overall bending, while the degree of the tube's depression is positively related to the gap ratio. The  $F_{eq}$ ,  $F_m$  and  $E_a$  reduce with the increase of gap ratio, but the  $\delta_m$  and  $\delta_r$  are in an opposite trend.

**Keywords:** gap imperfection; concrete-filled steel tube; lateral impact; numerical analysis; failure mode

近年来随着社会机械化水平的不断提高和交通事业的飞速发展,车辆、船舶及飞行器等机械撞击工程结构的事件发生频率显著提升。通过对近40年来国内外桥梁安全事故的调查发现,由车船撞击桥梁墩柱造成严重损伤或垮塌事故的比例约占总体安全事故的20%,是地震引发桥梁损坏比例的4倍<sup>[1]</sup>。因此,鉴于侧向撞击事故的发生频率及其造成的人员伤亡和经济损失的严重程度,尤其需要重视侧向冲击荷载对桥梁等结构墩柱动力性能的影响。而钢管混凝土由于具有强度高、塑性和韧性好、抗震性能优越及施工方便等优势,近年来在高层建筑、桥梁工程、重载交通和海洋开发等领域中得到了广泛应用<sup>[2-3]</sup>。特别是当钢管混凝土作为城市高架、跨河桥梁的常见墩柱时更应具有较强的抗侧向冲击能力,以确保结构在服役期内的安全可靠。

然而,交通运输协会对全国200余座在服役期内的钢管混凝土桥梁拱肋及墩柱的检测发现,出现混凝土脱空缺陷的桥梁占比高达80%<sup>[4]</sup>。实际上钢管混凝土结构的脱空缺陷问题具有一定的普遍性,其原因主要与混凝土质量不达标、施工方式不规范、内外养护温差大以及混凝土材料收缩等因素有关<sup>[5]</sup>。相关研究表明,脱空缺陷的出现会导致钢管与混凝土界面之间发生脱离,削弱或消除了二者间的支撑约束作用,从而降低了钢管混凝土构件的承载力、刚度和延性等力学性能<sup>[6]</sup>。特别是在动载、腐蚀、高温等条件下,忽略脱空缺陷的影响会使实际工程存在较大的安全隐患,可能导致结构损伤、破坏甚至倒塌,进而造成严重的人员伤亡和经济损失。

针对冲击灾害的多发性和严重性,国内外学者已对钢管混凝土构件在冲击荷载下的动态本构<sup>[7-9]</sup>、动力性能<sup>[3,10-12]</sup>以及剩余承载力<sup>[13-14]</sup>开展了丰富的试验和理论研究,为冲击作用下钢管混凝土构件的承载力、变形、应变和耗能等冲击动力响应研究以及抗冲击设计提供了理论依据。但目前对于钢管混凝土冲击性能的研究均未考虑实际结构中普遍存在的脱空缺陷问题,尚缺乏带脱空

缺陷钢管混凝土构件在侧向冲击下的动力性能和受力机理分析。目前对带脱空缺陷钢管混凝土的研究主要集中在静力性能方面<sup>[15-20]</sup>,其动力性能的研究仅局限于部分滞回荷载试验<sup>[21-22]</sup>,因此国内外尚缺乏对于带脱空缺陷钢管混凝土在侧向冲击荷载下的动态响应与工作机理研究。

因此,本文拟基于相关试验结果,构建带球冠形脱空的圆钢管混凝土柱在侧向冲击作用下的有限元分析模型,分析脱空率、径厚比、冲击质量、冲击速度和冲击方位等关键参数对冲击力、挠度变形和耗能等冲击性能指标的影响,揭示侧向冲击荷载下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的主要破坏模式、特征时程曲线、冲击力扩散路径和界面接触行为。研究结果旨在为实际钢管混凝土结构中脱空缺陷的评估与防治提供科学依据。

## 1 建模方法

### 1.1 材料模型

有限元模型包括钢材和混凝土材料。其中钢材的静态单轴应力-应变关系可采用文献[3]推荐的二次流塑模型,如式(1)所示。

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \epsilon_s & \epsilon_s \leq 0.8\epsilon_c \\ -A\epsilon_s^2 + B\epsilon_s + C & 0.8\epsilon_c < \epsilon_s \leq \epsilon_c \\ f_y & \epsilon_c < \epsilon_s \leq 10\epsilon_c \\ f_y \left[ 1 + 0.6(\epsilon - 10\epsilon_c) / (90\epsilon_c) \right] & 10\epsilon_c < \epsilon_s \leq 100\epsilon_c \\ 1.6f_y & \epsilon_s > 100\epsilon_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_s$ 和 $\epsilon_s$ 分别为钢材的应力和应变; $E_s$ 、 $f_y$ 和 $\epsilon_c$ 分别为钢材的弹性模量、静态屈服强度和屈服应变; $A$ 、 $B$ 和 $C$ 分别为与屈服强度和应变相关的参数,其中 $A=f_y/\epsilon_c$ , $B=0.2A\epsilon_c$ , $C=0.8f_y+A\epsilon_c^2-B\epsilon_c$ 。

同时考虑低速冲击作用下钢材的应变率效应,即钢材强度随加载速率的增大而增大的现象,需引入Cowper-

Symonds 应变率模型<sup>[23]</sup>,具体表达式为:

$$f_{yd}/f_y = 1 + (\dot{\epsilon}/D)^{1/n} \quad (2)$$

式中: $f_{yd}$ 为钢材动态屈服强度; $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$ ,为应变率;参考文献[24],参数 $D$ 和 $n$ 的取值分别为 $6\ 844\ s^{-1}$ 、 $3.91$ 。

由于球冠形脱空缺陷的存在,核心混凝土在静力状态下出现了显著的分区现象<sup>[18]</sup>。基于文献[18-19],可将核心混凝土截面分为脱空区(I区)和接触区(II区)。其中I区混凝土静态应力-应变关系采用文献[18]推荐的无约束混凝土本构模型,表达式为:

$$Y = \frac{AX + BX^2}{1 + CX + DX^2} \quad (3)$$

式中: $Y = \sigma_c/f_{c0}$ ;  $X = \epsilon_c/\epsilon_{c0}$ ;  $f_{c0}$ 和 $\epsilon_{c0}$ 分别为无约束混凝土受压状态下的峰值应力和峰值应变。

研究表明,II区的核心混凝土与无脱空钢管混凝土的接触作用相近,因此其静态本构关系模型可采用韩林海<sup>[3]</sup>推荐的钢管核心混凝土应力-应变关系,表达式为:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ x / [\beta_0(x-1)^\eta + x] & x > 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$y = \sigma_{cc}/f_{c0}, x = \epsilon_{cc}/\epsilon_{c0}, \epsilon_{c0} = \epsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}, \\ \epsilon_c = (1\ 300 + 12.5f_{c0}) \times 10^{-6}, \xi = A_s f_y / (A_c f_{ck}), \\ \beta_0 = 0.5 \times (2.36 \times 10^{-5})^{0.25 + (\xi - 0.5)^7} f_c^{0.5}$$

式中: $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度设计值; $f_{ck} = 0.67f_{cu}$ ,为核心混凝土棱柱体抗压强度,其中 $f_{cu}$ 为混凝土立方体抗压强度; $A_s$ 和 $A_c$ 分别为钢管和混凝土截面面积; $\eta$ 为与混凝土应变发展有关的系数。

对于核心混凝土的受拉应力-应变关系,为简化模型,常将其假定为线性模型<sup>[3]</sup>。根据文献[19],可表示为:

$$\sigma_t = \begin{cases} E_c \epsilon_t & \epsilon_t \leq \epsilon_{t0} \\ f_{t0} [1 - (\epsilon_t - \epsilon_{t0}) / (\epsilon_{tu} - \epsilon_{t0})] & \epsilon_t > \epsilon_{t0} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f_{t0} = 0.1f_{c0}$ ,为混凝土峰值拉应力; $E_c$ 为混凝土弹性模量; $\epsilon_{t0}$ 为混凝土峰值拉应变; $\epsilon_{tu}$ 为混凝土极限拉应变。

同样,考虑核心混凝土在低速冲击作用下的应变率效应,采用规范CEB<sup>[9]</sup>中建议的动力放大系数来计算其动态强度,表达式如下:

$$f_{c,d}/f_{c,s} = \begin{cases} (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{1.026\alpha_s} & \dot{\epsilon} \leq 30\ s^{-1} \\ \gamma (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{1/3} & \dot{\epsilon} > 30\ s^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{t,d}/f_{t,s} = \begin{cases} (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{1.016\beta} & \dot{\epsilon} \leq 30\ s^{-1} \\ \beta (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{1/3} & \dot{\epsilon} > 30\ s^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\log \gamma_s = 6.15\alpha_s - 2, \alpha_s = 1 / (5 + 9f_{c,s}/f_{c0}),$$

$$\log \beta = 7.11\delta - 2.33, \delta = 1 / (10 + 6f_{c,s}/f_{c0})$$

式中: $f_{c,d}$ 和 $f_{t,d}$ 分别为混凝土动态抗压和抗拉强度; $f_{c,s}$ 和 $f_{t,s}$ 分别为混凝土静态抗压和抗拉强度; $\dot{\epsilon}_s$ 和 $\dot{\epsilon}$ 分别为冲击作用下的准静态和动态应变率,本文 $\dot{\epsilon}$ 一般取为 $10 \sim 100\ s^{-1}$ , $\dot{\epsilon}_s$ 取为 $3 \times 10^{-5}\ s^{-1}$ 。

## 1.2 几何模型

本文采用ABAQUS软件中的动力学模块Explicit进行几何建模。几何模型主要涉及单元选取、接触设置和边界条件等问题。其中,钢管和核心混凝土采用实体单元C3D8R模拟,落锤和支座采用离散刚体单元R3D4模拟。

接触作用主要分为“钢-混凝土”和“钢-钢”界面接触。接触行为均采用“通用接触”定义,其中法向行为均设置为“硬接触”,切向行为采用库伦摩擦模拟,根据文献[3],钢-混凝土摩擦系数设为0.6,钢-钢摩擦系数设为0.4。

模型边界条件可根据实际情况进行设定。冲击荷载通过参数计算,以初速度的方式直接施加于落锤上。为施加轴力,首先在柱两端设置弹簧,并在极短的时间内( $10^{-4}\ s$ 左右)对弹簧施加位移(分析步1),以模拟实际加载的轴向压力。随后,在分析步1结束时,落锤与刚好下降至与试件表面接触,进入分析步2,实现冲击全过程的模拟。典型有限元分析模型如图1所示。

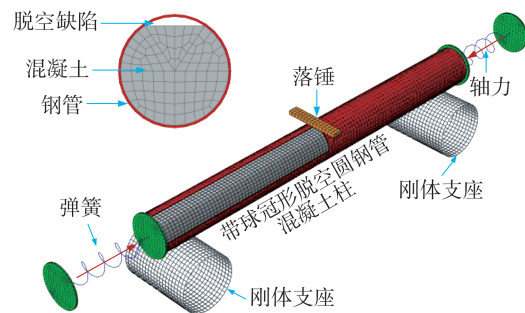


图1 精细化有限元分析模型

Fig. 1 Refined finite element analysis model

## 2 模型验证

由于目前尚缺乏带脱空缺陷钢管混凝土构件抗侧向冲击的相关试验数据,为验证本文模型的准确性和可行性。首先通过带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的轴压<sup>[25]</sup>和抗弯<sup>[26]</sup>静力试验,验证侧向冲击作用下带脱空圆钢管混凝土柱静态本构的准确性。随后,基于圆钢管混凝土侧向抗冲击性能试验<sup>[11,27]</sup>验证模型动态本构和几何模型的准确性。在此基础上,进一步开展带脱空缺陷圆钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的动力响应及受力机理分析。

### 2.1 静力试验验证

图2a)~c)给出了带脱空缺陷圆钢管混凝土轴压短柱的荷载-位移曲线结果对比。可见模型计算曲线与试验曲线吻合良好,峰值荷载的最大误差仅为5.1%;同样

地,图2d)~f)给出了带脱空缺陷圆钢管混凝土柱抗弯试验与模拟结果的对比,弯矩比值的最大误差仅为7.8%,模拟结果与试验结果总体吻合良好。

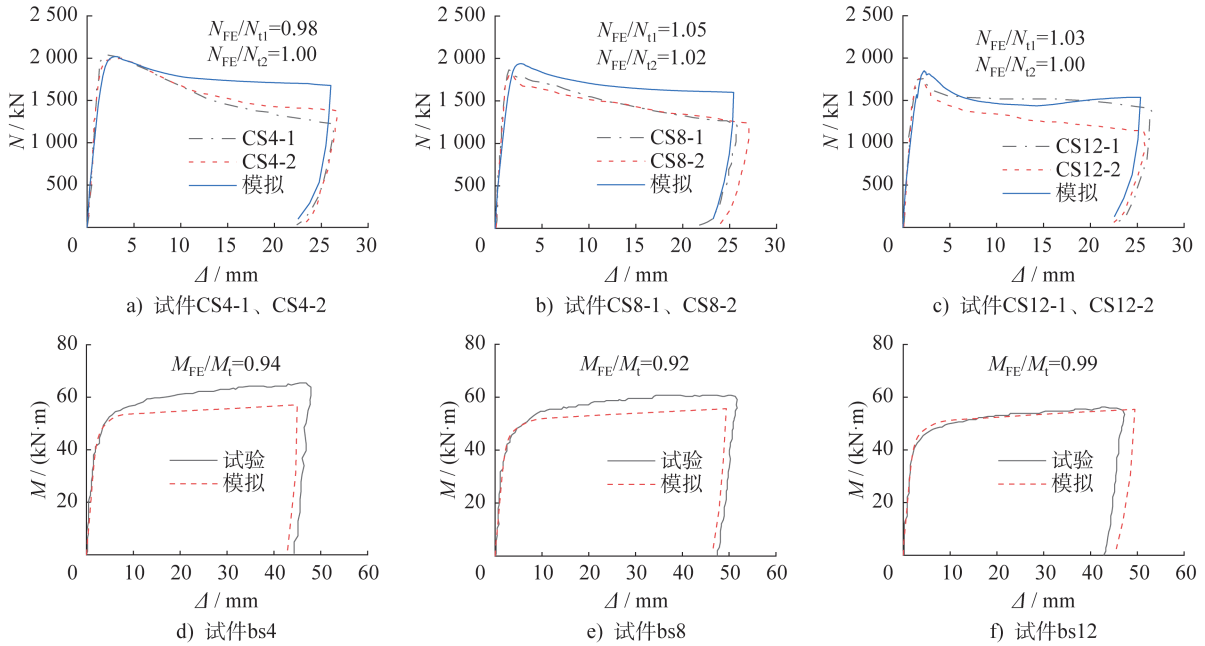


图2 带球冠形脱空圆钢管混凝土构件的试验<sup>[25-26]</sup>与有限元模拟结果的对比

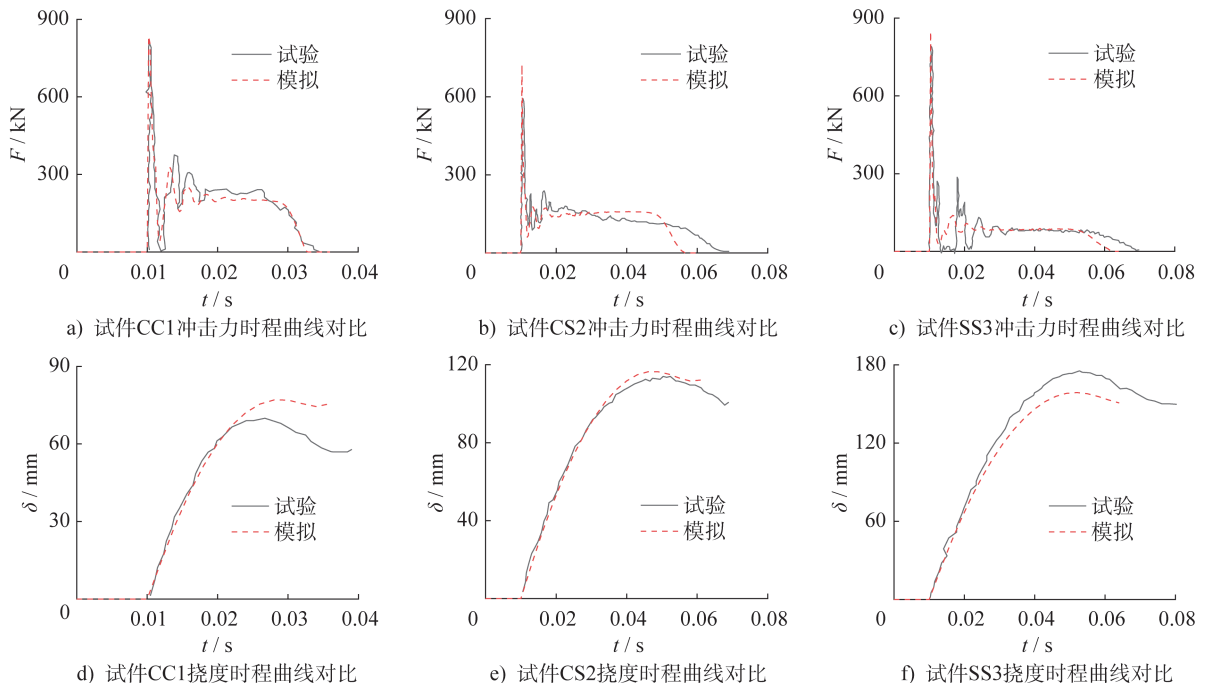
Fig. 2 Comparison of circular CFST columns with spherical-cap gap between test<sup>[25-26]</sup> and FE simulation results

### 2.2 动力试验验证

图3给出了试验得到的冲击力时程曲线、挠度时程曲线以及冲击特征值与有限元模拟结果的对比。可见,冲击动力

试验的全过程时程曲线和特征值均与模拟结果吻合良好。

因此,本文建立的有限元模型能够用于带球冠形脱空圆钢管混凝土柱在侧向冲击作用下的响应分析。



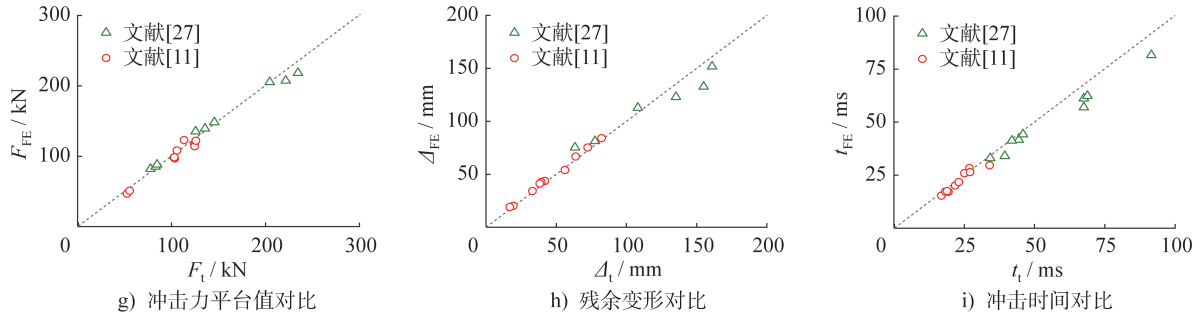


图3 圆钢管混凝土柱侧向冲击试验<sup>[11,27]</sup>与有限元模拟结果的对比

Fig. 3 Comparison of circular CFST columns under lateral impact between test<sup>[11,27]</sup> and FE simulation results

### 3 机理分析

#### 3.1 典型破坏模式

图4给出了带球冠形脱空圆钢管混凝土柱在侧向冲击

击作用下的典型破坏模式,并就脱空率这一关键参数的影响进行了分析。分析模型采用最不利脱空方位 $0^\circ$ ,边界条件设为两端铰接。

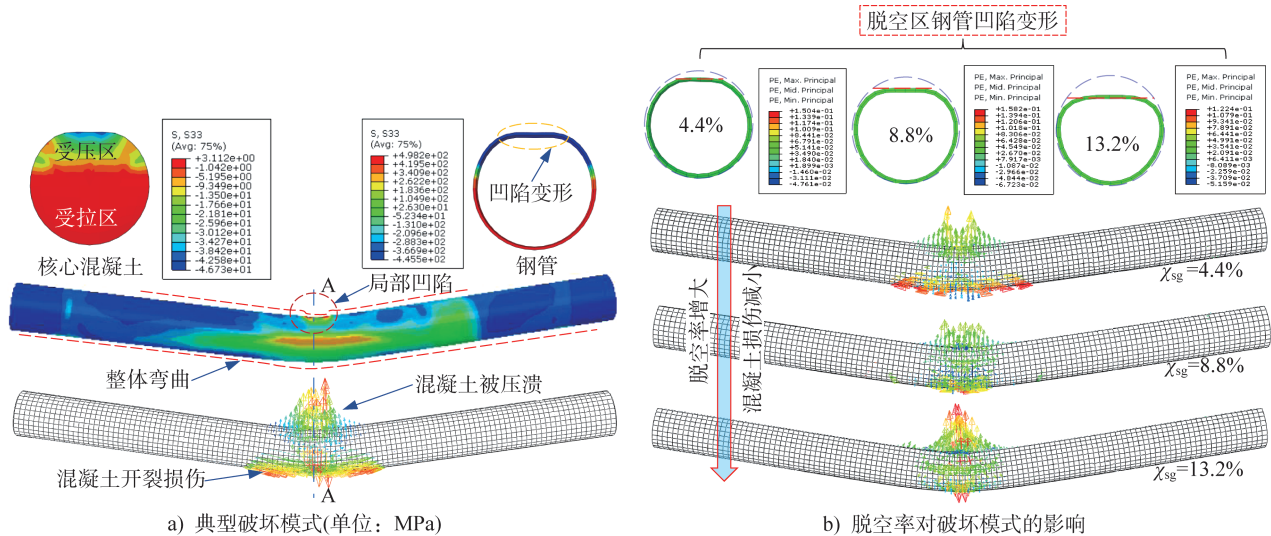


图4 球冠形脱空影响下构件的典型破坏模式

Fig. 4 Typical failure modes of components influenced by the spherical-cap gap

分析结果表明,带球冠形脱空圆钢管混凝土柱在侧向冲击作用下的破坏模式主要包括:(1)试件上表面钢管受冲击作用发生局部凹陷变形,核心混凝土同时出现局部压溃现象;(2)试件下表面钢管出现较大的拉应力,且核心混凝土下表面在拉应力作用下出现一定程度的开裂;(3)试件整体出现一定程度的挠曲变形。

通过关键参数分析可知,在侧向冲击作用下,脱空区钢管由于缺乏核心混凝土的支撑作用,发生了显著凹陷。同时,钢管的凹陷变形随着脱空率的增大而增大。但核心混凝土由于脱空区钢管的大变形耗散了较多的冲击能量,因而其局部压溃损伤程度随着脱空率的增大而逐渐减轻。总体而言,钢管和混凝土局部损伤呈现出此消彼长的趋势;就构件整体变形而言,随着脱空率的增大,圆钢管混凝土柱的整体挠度变形也逐渐增大。

#### 3.2 冲击时程特征曲线

基于数值分析结果,得到侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的冲击时程特征曲线,包括冲击力、冲击挠度、冲击速度、支座反力和惯性力时程曲线,如图5所示。图中 $F_{max}$ 为冲击力峰值,由提取的冲击落锤的反力值确定; $V_{h,max}$ 为落锤的冲击速度,由提取的落锤底面中点的速度确定; $V_{s,max}$ 为构件在冲击处截面下端点的下挠速度; $w_{max}$ 为构件在冲击处截面下边缘点的最大挠度。标准分析模型的关键参数如表1中红色加粗字体所示。

如图5所示,带球冠形脱空圆钢管混凝土构件与无脱空钢管混凝土构件的冲击时程曲线相似,同样可以分为震荡段、平台段和下降段<sup>[3]</sup>。

(1) 震荡段:在此阶段,落锤与构件初步接触,冲击力迅速达到峰值,随后衰减并发生震荡。与无脱空钢管混凝土

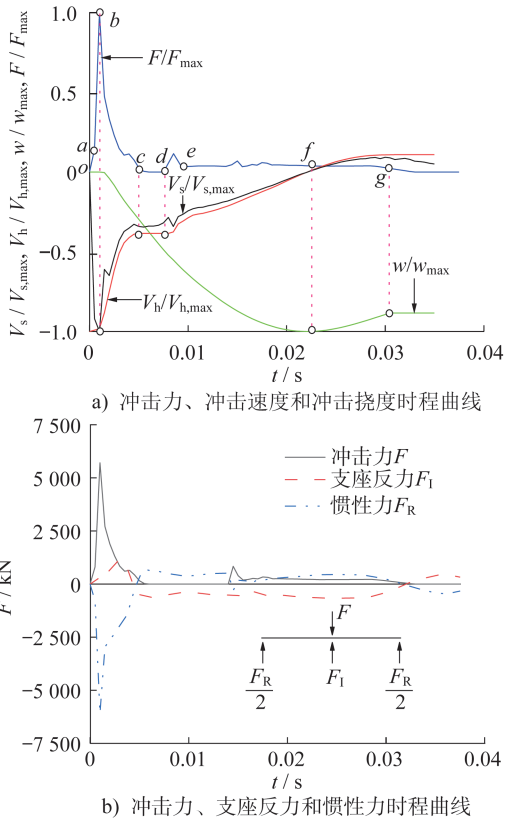


图5 冲击时程特征曲线

Fig. 5 Impact time-history characteristic curves

表1 分析参数范围

Table 1 Range of analysis parameters

| 参数                                    | 范围              |
|---------------------------------------|-----------------|
| 脱空率 $\chi_{rg}/\%$                    | 0、4、8、16        |
| 脱空方位 $\theta/(\circ)$                 | 0、90、180        |
| 冲击速度 $V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 10.4、14.7、20.8  |
| 冲击质量 $m/\text{kg}$                    | 500、1 000、2 000 |
| 长径比 $L/D$                             | 6、9、12          |
| 径厚比 $D/t$                             | 33.3、50.0、100.0 |
| 轴压比 $n$                               | 0、0.1、0.3、0.5   |
| 钢材屈服强度 $f_y/\text{MPa}$               | 235、355、460     |
| 混凝土抗压强度 $f_{cu}/\text{MPa}$           | 40、50、60        |
| 边界条件                                  | F-F、F-P、P-P     |

注:F-F、F-P、P-P分别表示边界条件为两端固接、一端固接一端铰接和两端铰接。

土构件的震荡阶段不同,带球冠形脱空钢管混凝土在冲击力达到峰值前,伴随着明显的刚度变化。这是由于落锤首先与脱空区钢管接触,脱空区钢管在缺乏混凝土的直接支撑作用下,冲击力刚度较小;随着冲击锤的挤压,脱空区钢管凹陷,随后与混凝土脱空界面接触。此后,由于混凝土的支撑作用,冲击力时程曲线的刚度迅速增大。同时,构

件有脱离支座的趋势,支座反力在前期首先沿冲击方向达到最大值。惯性力为支座反力与冲击力之和,惯性力的方向与冲击的方向相反并快速达到最大值。

(2) 平台段:在经过初期震荡之后,钢管脱空区变形稳定,冲击力、惯性力和支座反力在一段时间内保持一稳定值,时程曲线表现为一个平台段,试件在此阶段完成冲击的主要耗能过程。

(3) 衰减段:冲击力经过平台段后迅速衰减,最终衰减为0 kN。

### 3.3 冲击力全过程扩散机理

为明确脱空缺陷对冲击力在钢管混凝土构件中扩散模式的影响,本节对关键冲击时间节点下冲击点处横截面的应力分布进行了研究,如图6所示。分析模型几何与材性参数与3.2节模型相同。

在落锤冲击初期,脱空区钢管开始出现凹陷变形。当脱空区钢管未与混凝土脱空界面接触时,冲击力通过钢管壁传递至钢管与核心混凝土的接触区域,即球冠形脱空区拐角处具有较大的应力水平(图6a),冲击力时程曲线表现为oa段。

随后,脱空区钢管开始在冲击挤压作用下接触混凝土脱空界面,冲击力开始直接由混凝土脱空界面接触点传递至内部核心混凝土,脱空界面的应力水平最高。相比于脱空区钢管未接触混凝土脱空界面的情况,此阶段的冲击力时程曲线由于内部核心混凝土的支撑作用,上升段斜率明显增大(图6b),冲击力时程曲线表现为ab段。

在此之后的bc段,随着落锤加速度和速度的变化,落锤的速度减小甚至发生与钢管脱离的情况。如cd段,落锤与构件的速度变化较小,表现为冲击力接近0 kN。随后,落锤与构件的加速度和速度发生相对变化,落锤重新与钢管外表面接触,表现为冲击力和核心混凝土截面区域应力的变幅震荡,即冲击力时程曲线的de段(图6c、d)。

在d点之后,经过短暂震荡,落锤与钢管混凝土的速度匀速衰减,加速度最终保持一致,冲击进入稳定阶段,冲击力时程曲线表现为ef段,此时冲击应力在核心混凝土中的分布相对稳定,核心混凝土在上部脱空界面处存在由落锤冲击作用引发的局部压应力,且压应力分布也较为稳定(图6e、f)。

最终fg阶段,落锤与试件速度减小至0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,带脱空钢管混凝土的动力效应消除,转变为落锤自重影响下构件抗弯的静力行为。同时,核心混凝土截面下部在落锤与自重作用下存在较大的拉应力。

### 3.4 接触行为分析

为了进一步明确钢管和混凝土在冲击过程中的接触行为,对冲击区关键点的接触应力和相对变形进行分析。

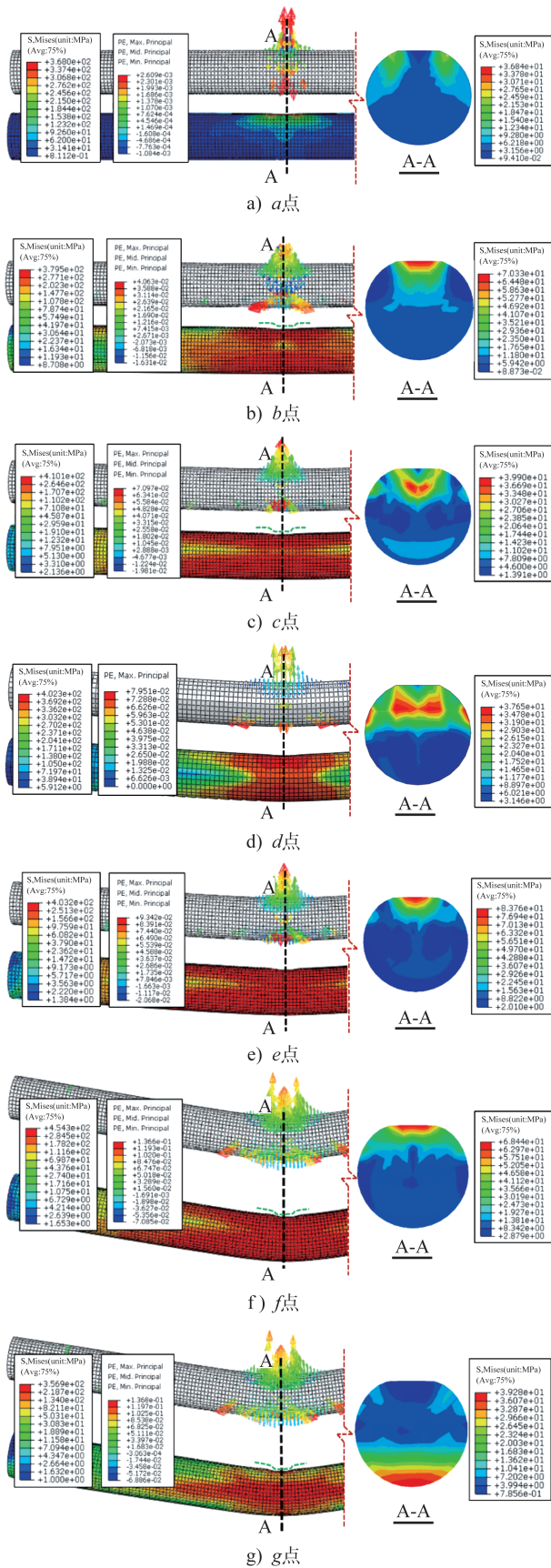


图6 冲击全过程构件应力、应变云图

Fig. 6 Stress and strain contours of components during the whole impact process

同样以标准分析模型为例,分析了撞击区域的截面。如图7所示,  $A'$ 点为冲击点截面的竖向对称轴与管内壁的上交点;  $A$ 点为混凝土脱空界面的中点;  $B$ 点为混凝土脱空界面处与钢管接触的端点;  $C$ 点和  $D$ 点分别为钢管水平对称轴的右端点和竖向对称轴的下端点。

整个冲击过程中接触应力的时程曲线见图7。可以得出如下结论:

(1)  $A$ 点的接触应力明显大于  $C$ 点和  $D$ 点的接触应力。这是由于  $A$ 点为冲击作用轴线上的最近撞击点,因此表现出一定的冲击挤压行为。 $A'$ 点和  $A$ 点接触后重合,二者冲击挤压作用和接触压力相同。同时,由于球冠形间隙的存在,在脱空区域的钢管挤压并接触混凝土之前,  $A'$ 点和  $A$ 点的接触应力为0 MPa(图7a))。

(2) 同样地,通过分析  $A'$ 点和  $A$ 点之间的相对位移,也可以发现二者之间的相对变形值等于脱空值,最终稳定在8 mm,并且在进入平台段后相对变形基本保持不变,如图7b)所示。

(3) 与  $A'$ 点和  $A$ 点相比,处于脱空界面的端点  $B$ 点,由于拐角效应引发的应力集中,其接触应力相对较高。与  $A'$ 点和  $A$ 点不同,脱空区域中的钢管与  $B$ 点的混凝土直接接触,因此其接触应力从冲击发生瞬间即开始产生。

(4)  $C$ 点和  $D$ 点的接触应力相对较小,因为二者均远离冲击直接作用的区域,但其与钢管的接触作用从冲击发生的一开始就出现了。与  $A'$ 点、 $A$ 点和  $B$ 点不同,  $C$ 点和  $D$ 点在冲击结束后,由于重力荷载的存在,其仍然具有一定的接触应力。

(5) 此外,提取  $A$ 点和  $D$ 点之间的相对变形(即  $U_A - U_D$ )可以发现,  $U_A - U_D$ 在冲击全过程中略有增加,表明混凝土截面也因冲击作用在竖向而发生凹陷和损坏。

## 4 参数分析

基于所建立的带球冠脱空钢管混凝土柱侧向冲击有限元模型,本节拟对不同参数下带球冠脱空圆钢管混凝土柱的抗侧向冲击性能进行研究,具体参数范围如表1所示。其中标准分析模型的尺寸为400 mm×8 mm×3 600 mm,其余参数信息如表1中加粗数据所示。值得说明的是,本节通过分别变化冲击质量和冲击速度来分析冲击能中各参数对带球冠脱空钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响。

### 4.1 脱空率

图8给出了脱空率为0%、4%、8%和16%(分别对应模型  $C-\chi_{sg}0$ 、 $C-\chi_{sg}4$ 、 $C-\chi_{sg}8$ 和  $C-\chi_{sg}16$ )时对带球冠脱空圆钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响。其中,  $F_m$ 、 $F_{eq}$ 分别为冲击力峰值和等效值,  $\delta_m$ 、 $\delta_r$ 分别为挠度变形

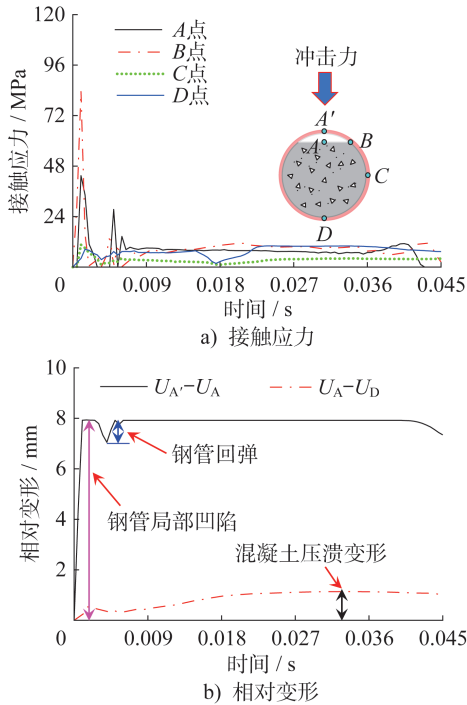


图7 冲击作用下带球形冠形脱空圆钢管混凝土构件的接触行为

Fig. 7 Contact behavior of circular CFST columns with spherical-cap gap under impact loads

最大值和残余值,  $E_a$  为耗能值。结果表明, 模型 C- $\chi_{sg}4$ 、C- $\chi_{sg}8$  和 C- $\chi_{sg}16$  的冲击力峰值分别比模型 C- $\chi_{sg}0$  的相应值减小了 31.9%、68.1% 和 80.3%, 等效冲击力分别减小了 21.0%、35.3% 和 50.2%; 而挠度变形最大值分别增大了 4.8%、15.2% 和 17.1%, 残余挠度变形分别增大了 12.4%、16.7% 和 20.7%; 此外, 耗能分别减小了 11.3%、24.5% 和 39.9%。可见, 侧向冲击作用下脱空圆钢管混凝土柱的冲击力响应和耗能能力随着脱空率的增大而显著减小, 挠度变形随着脱空率的增大而增大。

4.2 脱空方位

图9给出了脱空方位在正面(以脱空一侧为正面, 如图10所示)、侧面和背面(分别对应模型 C- $\theta_0$ 、C- $\theta_{90}$  和 C- $\theta_{180}$ )时对带球形冠形脱空圆钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响。结果表明, 模型 C- $\theta_{90}$  和 C- $\theta_{180}$  的冲击力峰值分别比模型 C- $\theta_0$  的相应值增大了 43.6% 和 34.4%, 等效冲击力分别增大了 24.0% 和 15.5%, 而残余挠度变形分别减小了 9.6% 和 6.0%; 同时, 耗能分别增大了 11.9% 和 8.6%。可见, 当脱空方位在侧面时, 圆钢管混凝土柱的冲击力响应和耗能最大; 当脱空方位在背面时, 其冲击力响应和耗能次之; 而挠度变形响应的规律刚好相反。

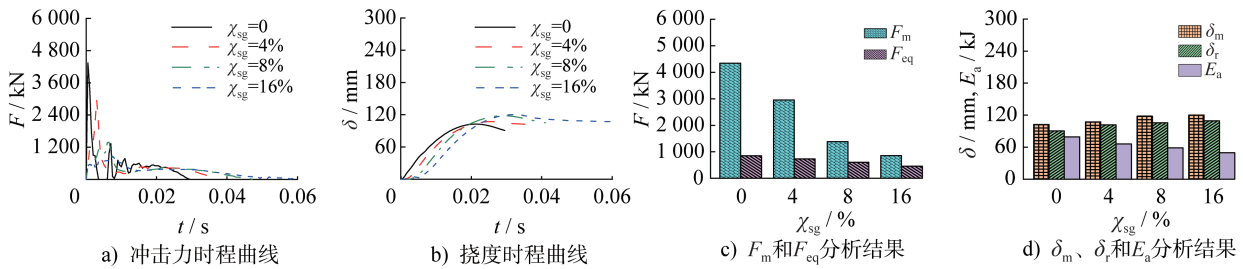


图8 脱空率的影响

Fig. 8 Influence of gap ratios

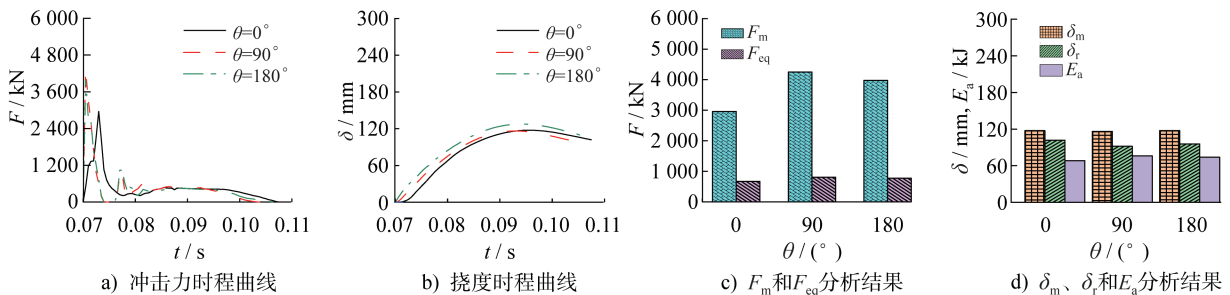


图9 脱空方位的影响

Fig. 9 Influence of gap directions

4.3 冲击速度

为了研究冲击速度对带球形冠形脱空圆钢管混凝土的

动力响应影响规律, 图11对冲击速度为  $10.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $20.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (分别对应模型 C-V10、C-V14

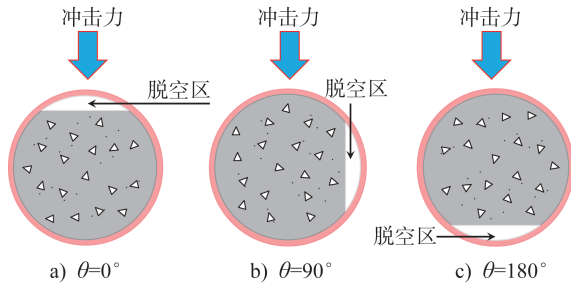


图 10 脱空方位  
Fig. 10 Gap directions

和 C-V21) 的带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的抗侧向冲击性能进行了分析。结果表明,模型 C-V14 和 C-V21 的冲击力峰值分别比模型 C-V10 的相应值增大了 141.1% 和 347.6%, 等效冲击力分别增大了 9.6% 和 20.1%, 挠度变形最大值分别增大了 104.4% 和 285.6%, 残余挠度变形分别增大了 119.8% 和 344.1%, 耗能分别增大了 140.9% 和 433.4%。可见,侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的冲击力、挠度和耗能响应均随着冲击速度的增大而明显增大。

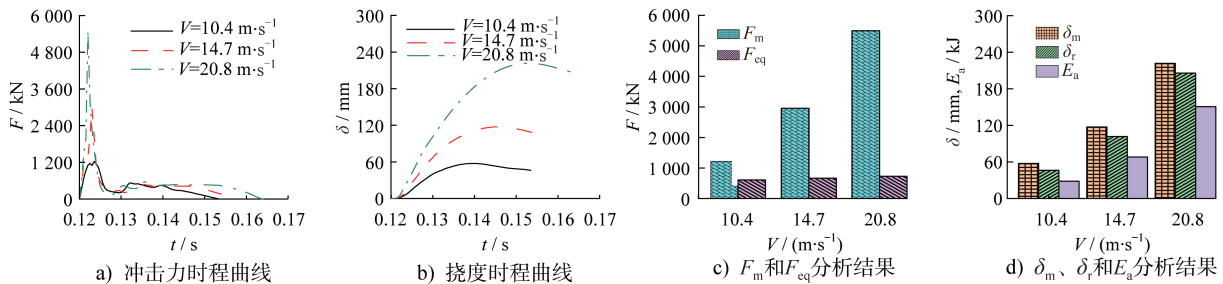


图 11 冲击速度的影响

Fig. 11 Influence of impact velocities

#### 4.4 冲击质量

图 12 给出了冲击质量为 500 kg、1 000 kg 和 2 000 kg (分别对应模型 C-m500、C-m1000 和 C-m2000) 时对球冠形脱空圆钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响。结果表明,模型 C-m1000 和 C-m2000 的冲击力峰值分别比模型 C-m500 的相应值增大了 82.8% 和 107.3%, 等效

冲击力分别减小了 13.9% 和 17.9%; 而残余挠度变形分别增大了 160.3% 和 516.3%, 挠度变形最大值分别增大了 151.0% 和 451.0%, 耗能分别增大了 196.5% 和 626.8%。可见,侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的冲击力、挠度和耗能均随着冲击质量的增大而增大。

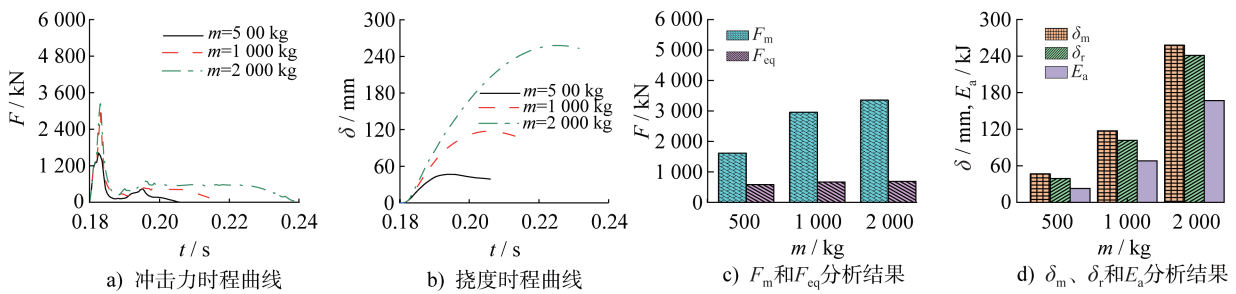


图 12 冲击质量的影响

Fig. 12 Influence of impact masses

#### 4.5 长径比

图 13 给出了长径比为 6、9 和 12 (分别对应模型 C-L/D6、C-L/D9 和 C-L/D12) 时对带球冠形脱空圆钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响。分析表明,模型 C-L/D9 和 C-L/D12 的冲击力峰值分别比模型 C-L/D6 的相应值减小了 18.9% 和 33.2%, 等效冲击力分别减小了 36.5% 和 51.9%; 而残余挠度变形分别增大了 56.5%

和 99.2%, 挠度变形最大值分别增大了 57.8% 和 104.7%; 耗能变化不大。由此表明侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的冲击力响应随着长径比的增大而减小, 而挠度变形随着长径比的增大而增大。

#### 4.6 径厚比

图 14 给出了侧向冲击作用下不同径厚比(径厚比分

别为100.0、50.0和33.3,对应的钢管壁厚为4 mm、8 mm和12 mm,对应模型C-t4、C-t8和C-t12)对带球冠形脱空圆钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响。结果表明,模型C-t8和C-t12的冲击力峰值分别比模型C-t4的相应值增大了15.2%和60.6%,等效冲击力分别增大了86.0%和

522.6%;而残余挠度变形分别减小了49.4%和92.4%,挠度变形最大值分别减小了44.0%和81.3%;耗能分别减小了5.9%和52.7%。由此可见,侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的冲击力响应随着径厚比的减小而显著增大,挠度变形和耗能随着径厚比的增大而减小。

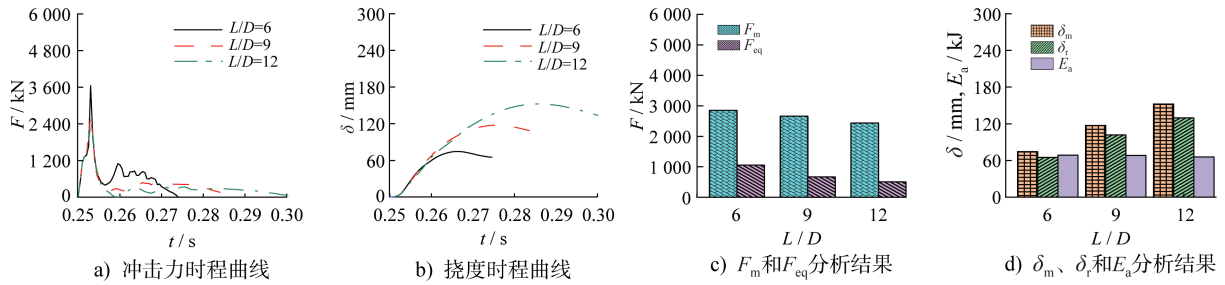


图13 长径比的影响

Fig. 13 Influence of length-to-diameter ratios

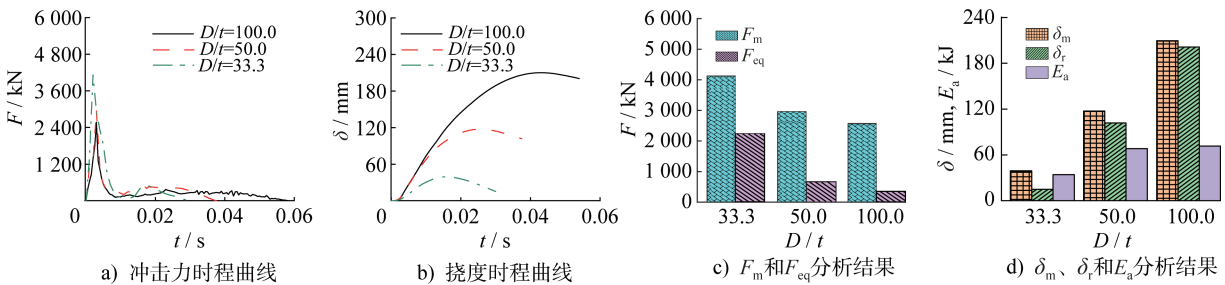


图14 径厚比的影响

Fig. 14 Influence of radius-to-thickness ratios

### 4.7 轴压比

图15给出了轴压比为0、0.1、0.3和0.5(分别对应模型C-n0、C-n1、C-n3和C-n5)时对带球冠形脱空圆钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响。结果表明,模型C-n1、C-n3和C-n5的冲击力峰值分别比模型C-n0的相应值增大了18.35%、36.6%和56.5%,但等效冲击力分别减小了

2.8%、10.1%和33.8%;残余挠度变形分别增大了6.0%、27.3%和81.1%,挠度变形最大值分别增大了4.2%、19.9%和61.9%;总体耗能分别增大了3.0%、14.4%和19.9%。因此,带球冠形脱空圆钢管混凝土柱在侧向冲击作用下的等效冲击力随着轴压比的增大而显著减小,冲击力峰值、挠度变形和耗能随着轴压比的增大而增大。

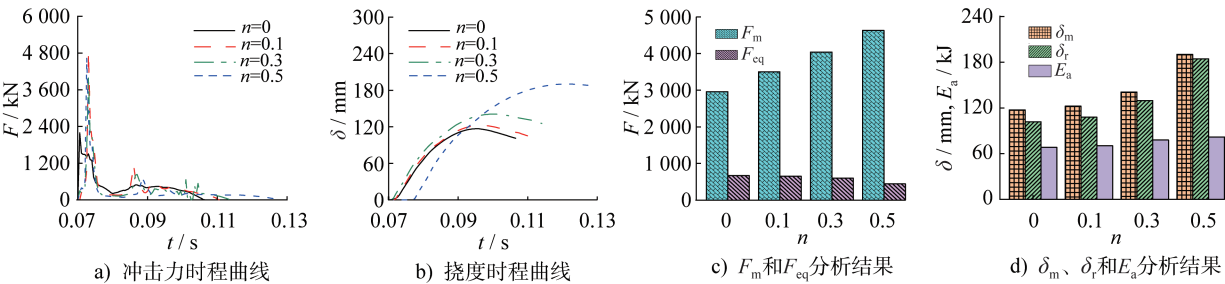


图15 轴压比的影响

Fig. 15 Influence of axial compression ratios

### 4.8 钢材强度

图16给出了钢材屈服强度为235 MPa、355 MPa和

460 MPa(分别对应模型C-Q2、C-Q3和C-Q4)时对带球冠形脱空圆钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响。结果

表明,模型 C-Q3 和 C-Q4 的冲击力峰值分别比模型 C-Q2 的相应值增大了 7.1% 和 17.7%,等效冲击力分别增大了 34.2% 和 76.9%;而残余挠度变形分别减小了 26.5% 和 46.7%,挠度变形最大值分别减小了 22.0% 和 36.9%;耗

能分别减小了 1.3% 和 5.7%。由此表明侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的冲击力值随着钢材强度的增大而显著增大,挠度变形和耗能随着钢材强度的增大而减小。

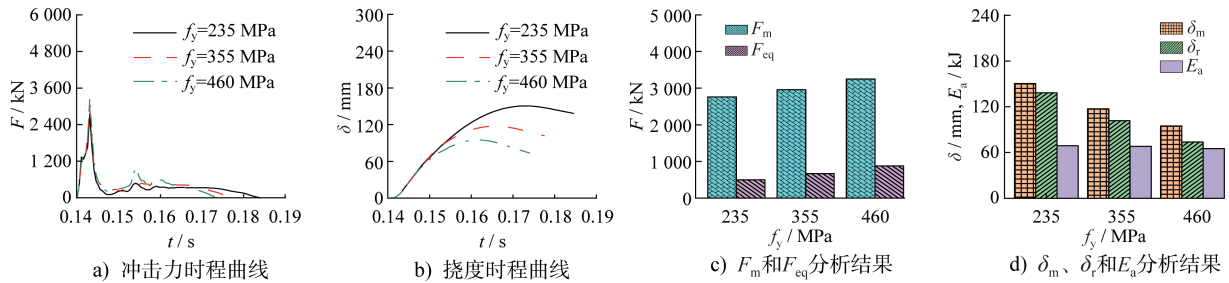


图 16 钢材强度的影响

Fig. 16 Influence of steel strengths

#### 4.9 混凝土强度

图 17 给出了混凝土抗压强度为 40 MPa、50 MPa 和 60 MPa(分别对应模型 C-C4、C-C5 和 C-C6)时对带球冠

形脱空圆钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响。结果表明,混凝土强度对侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱冲击力、挠度变形和耗能的影响较小。

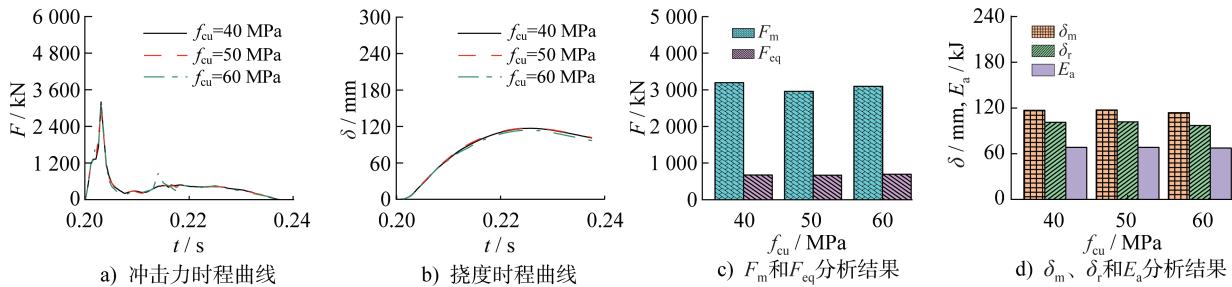


图 17 混凝土强度的影响

Fig. 17 Influence of concrete strengths

#### 4.10 边界条件

图 18 给出了边界条件为两端固接、一端固接一端铰接和两端铰接(分别对应模型 C-FF、C-FP 和 C-PP)时对带球冠形脱空圆钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响。结果表明,模型 C-FP 和 C-FF 的冲击力峰值分别比模型 C-PP 的相应值增大了 7.4% 和 17.1%,等效冲击力分别

增大了 42.2% 和 85.5%;残余挠度变形分别减小了 30.3% 和 48.9%,挠度变形最大值分别减小了 28.3% 和 45.9%;而总耗能的变化较小。由此表明侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的冲击力随着边界条件的弱化而显著减小,挠度变形随着边界条件的弱化而增大,但耗能基本不变。

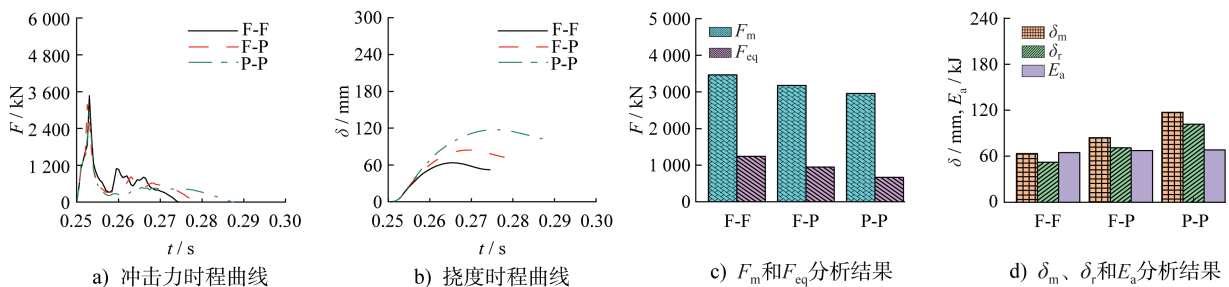


图 18 边界条件的影响

Fig. 18 Influence of boundary conditions

## 5 结论

基于本文对带球冠形脱空圆钢管混凝土构件的抗侧向冲击性能研究,可以得到以下主要结论:

(1) 采用ABAQUS软件建立了侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土构件的精细化数值分析模型,并与带球冠形脱空圆钢管混凝土柱相关静力试验和圆钢管混凝土柱侧向冲击试验的结果进行了对比验证,表明本文建立的有限元模型可用于分析带球冠形脱空圆钢管混凝土柱的侧向抗冲击性能。

(2) 由于球冠形脱空的存在,钢管在侧向冲击作用点处会出现显著的局部凹陷,且变形程度随着脱空率的增大而增大。然而值得说明的是,在相同冲击作用下,随着脱空率的增大,钢管凹陷变形所消耗的冲击能占比有所提升,使得核心混凝土的损伤程度略微降低。

(3) 带球冠形脱空圆钢管混凝土柱在侧向冲击作用下的冲击力时程曲线仍然可划分为震荡段、平台段和下降段。然而,有别于无脱空钢管混凝土柱,侧向冲击作用下带球冠形脱空圆钢管混凝土柱在达到冲击力峰值前时程曲线会出现明显的刚度突变情况。

(4) 机理分析表明,在脱空区钢管接触混凝土之前,冲击力率先通过钢管传递至核心混凝土脱空区角部,并在第一时间产生较大的接触应力。随后钢管凹陷接触混凝土脱空界面,冲击力开始从脱空区界面中点向下传递,并出现较高的接触应力。

(5) 特征参数分析表明,圆钢管混凝土柱在侧向冲击作用下的冲击力最大值、等效值以及耗能均随着球冠形脱空的出现及脱空率的增大而显著减小,而挠度变形值的发展规律则相反。相比于脱空方位为 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 的构件,脱空方位为 $90^\circ$ 的构件由于抗弯刚度最大,且撞击区钢管与混凝土接触良好,其冲击力最大值、等效值和耗能最高,挠度变形最小。

## 参考文献:

[1] 刘斐. 近期桥梁安全事故深度调查与分析[D]. 长沙: 中南大学, 2014.  
LIU Fei. Analysis and investigation of recent bridge accidents[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)

[2] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论: 研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 1-15.  
ZHONG Shantong. Unified theory of concrete filled steel tube: research and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 1-15. (in Chinese)

[3] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016: 12-22.  
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016: 12-22.

(in Chinese)

[4] SHEN Q H, LI K X, WANG J F, et al. Cyclic behaviour of circular CFT-SG columns under axial tension-compression: novel FE modelling and design methods [J]. Structures, 2024, 62: 106148. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106148.

[5] 廖飞宇, 李艳飞, 尧国皇, 等. 带球冠形脱空缺陷的钢管混凝土构件拉弯试验和承载力计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5): 165-176. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0676.  
LIAO Feiyu, LI Yanfei, YAO Guohuang, et al. Mechanical behavior and design approach of concrete filled steel tubes with circular-segment gap under combined actions of tension and bending[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(5): 165-176. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0676. (in Chinese)

[6] 沈奇罕, 王静峰, 李景哲. 带球冠形脱空缺陷椭圆钢管混凝土短柱轴压性能及计算方法研究[J]. 工程力学, 2022, 39(12): 141-150. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.07.0548.  
SHEN Qihan, WANG Jingfeng, LI Jingzhe. Experimental investigation and design of axially loaded concrete filled elliptical steel tubular stub columns with spherical gaps [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(12): 141-150. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.07.0548. (in Chinese)

[7] 杨晓强, 朱勇, 杨华, 等. 考虑不同强度钢材动态本构模型差异的钢管混凝土侧向抗冲击性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增刊1): 370-377. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.S1.049.  
YANG Xiaoqiang, ZHU Yong, YANG Hua, et al. Finite element analysis of lateral impact resistance of concrete-filled steel tube considering the difference of dynamic constitutive models of different strength steels [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40 (Suppl. 1): 370-377. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.S1.049. (in Chinese)

[8] PRICHARD S J, PERRY S H. The impact behaviour of sleeved concrete cylinders [J]. Structural Engineer, 2000, 78(17): 23-27.

[9] Comite Euro-international Du Beton. CEB-FIP Model Code 1990[S]. London: Thomas Telford, 1993.

[10] 史艳莉, 何佳星, 王文达, 等. 内配圆钢管的圆钢管混凝土构件耐撞性能分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(9): 123-132. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.09.017.  
SHI Yanli, HE Jiaying, WANG Wenda, et al. Anti-impact performance analysis for circular CFST members with inner circular steel tube [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(9): 123-132. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.09.017. (in Chinese)

[11] 李珠, 王兆, 王蕊. 侧向冲击荷载作用下两端固定钢管混凝土构件的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(增刊1): 167-170, 175.  
LI Zhu, WANG Zhao, WANG Rui. Experimental study on concrete filled steel tube with fixed-ends under lateral impact loads [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (Suppl. 1): 167-170, 175. (in Chinese)

[12] 刘艳辉, 慈伟主, 赵一超, 等. 横向冲击作用下圆钢管混凝土

- 构件挠度尺寸效应研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 103-111. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.03.012.
- LIU Yanhui, CI Weizhu, ZHAO Yichao, et al. Size effects of deflection of concrete-filled circular steel tubular members under lateral impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(3): 103-111, 128. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.03.012. (in Chinese)
- [13] 曾希, 李锐, 杜国锋. 横向冲击后圆钢管混凝土柱剩余轴压承载力研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(23): 64-69. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.23.013.
- ZENG Xi, LI Rui, DU Guofeng. Research on residual axial bearing capacity of CFST columns with circular cross-section subjected to lateral impact [J]. Building Structure, 2019, 49(23): 64-69. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.23.013. (in Chinese)
- [14] GAO S, XU Y C, ZHANG S M, et al. Performance of square concrete-filled steel tubular columns under repeated lateral impact [J]. Engineering Structures, 2023, 280: 115719. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115719.
- [15] 叶勇, 李威, 陈锦阳. 考虑脱空的方钢管混凝土短柱轴压性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊1): 324-329. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S1.049.
- YE Yong, LI Wei, CHEN Jinyang. FEA on compressive behavior of square CFST short columns with circumferential gap between concrete and tube [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36 (Suppl. 1): 324-329. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S1.049. (in Chinese)
- [16] 李永进, 王志滨, 李东升. 长期荷载作用下带脱空缺陷钢管混凝土柱的受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(10): 112-120. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0589.
- LI Yongjin, WANG Zhibin, LI Dongsheng. Mechanical behavior of concrete-filled steel tubular columns with initial concrete imperfection under long-term sustained load [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(10): 112-120. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0589. (in Chinese)
- [17] 云迪, 郑皓文, 周贺. 脱空对钢管混凝土单圆管拱肋面内承载力的影响[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊1): 120-125. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S1.019.
- YUN Di, ZHENG Haowen, ZHOU He. Influence of filling-incompletion on in-plane bearing capacity of single concrete filled steel tubular arch ribs [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36 (Suppl. 1): 120-125. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S1.019. (in Chinese)
- [18] 王静峰, 刘伟, 沈奇罕, 等. 考虑环向脱空影响的椭圆钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(2): 50-63. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0670.
- WANG Jingfeng, LIU Wei, SHEN Qihan, et al. Investigation of axially-loaded concrete-filled elliptical steel tubular short columns considering the effect of circumferential gap [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44 (2): 50-63. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0670. (in Chinese)
- [19] SHEN Q H, WANG J F, WANG F Q, et al. Axial loading mechanism analyses and evaluation methods of CCFT short columns with gap defects [J]. Structures, 2022, 46: 1422-1432. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.11.015.
- [20] 陈汉元, 廖飞宇, 林志平, 等. 考虑脱空缺陷影响的钢管混凝土压弯剪力性能分析与实用设计方法[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(8): 70-81. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.08.007.
- CHEN Hanyuan, LIAO Feiyu, LIN Zhiping, et al. Analytical behavior and simplified method of concrete-filled steel tube with gap under combined compression-bending-shear actions [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(8): 70-81. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.08.007. (in Chinese)
- [21] 廖飞宇, 韩浩, 王宇航. 带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件在压弯扭复合受力作用下的滞回性能研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(7): 57-68, 80. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.20190326.001.
- LIAO Feiyu, HAN Hao, WANG Yuhang. Cyclic behaviour of concrete-filled steel tubular (CFST) members with circumferential gap under combined compression-bending-torsion load [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(7): 57-68, 80. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.20190326.001. (in Chinese)
- [22] 戴佩家, 廖飞宇, 王静峰, 等. 环口板加强带脱空缺陷的钢管混凝土T型节点滞回性能试验研究[J]. 工程力学, 2024, 41(6): 105-117. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.05.0469.
- DAI Peijia, LIAO Feiyu, WANG Jingfeng, et al. Tests on hysteretic performance of concrete filled steel tubular t-joints with spherical-cap gap reinforced by ring plate [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(6): 105-117. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.05.0469. (in Chinese)
- [23] LIU X Y, HE Z Y, YE J Y, et al. Study on dynamic mechanical behavior of Q460JSC and HQ600 high strength steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 173: 106232. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106232.
- [24] YANG X Q, YANG H, GARDNER L, et al. A continuous dynamic constitutive model for normal- and high-strength structural steels [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 192: 107254. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107254.
- [25] LIAO F Y, HAN L H, TAO Z. Behaviour of CFST stub columns with initial concrete imperfection: analysis and calculations [J]. Thin-Walled Structures, 2013, 70: 57-69. DOI: 10.1016/j.tws.2013.04.012.
- [26] LIAO F Y, HAN L H, HE S H. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: experiments [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12): 1922-1935. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.06.009.
- [27] HAN L H, HOU C C, ZHAO X L, et al. Behaviour of high-strength concrete filled steel tubes under transverse impact loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 92: 25-39. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.09.003.