

# 内配圆钢管的圆钢管混凝土构件耐撞性能分析

史艳莉<sup>1,2</sup>, 何佳星<sup>2</sup>, 王文达<sup>2</sup>, 鲜威<sup>2</sup>, 王蕊<sup>3</sup>

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050;  
3. 太原理工大学 建筑与土木工程学院, 太原 030024)

**摘要:** 内配圆钢管的圆钢管混凝土是一种新型复合形式的组合构件,由圆钢管混凝土内部配置同心位置的圆管,并在内部圆管的内外两侧均浇筑混凝土而形成的构件。基于有限元软件 ABAQUS 对内配圆钢管的圆钢管混凝土构件在低速横向撞击作用下的耐撞性能进行了数值模拟,数值结果与其他研究者完成的钢管混凝土、中空夹层钢管混凝土试件的撞击试验数据进行了对比,验证了模型的正确性。采用该模型分析了此类组合构件在横向撞击作用下的动力响应全过程及其典型破坏模式,对影响其耐撞性能的主要影响参数进行了分析,初步得出了各主要影响参数对此类组合构件耐撞性能的影响。参数分析结果表明,提高外钢管的强度及含钢率可以有效地改善该构件的耐撞性能,而混凝土强度的变化对构件耐撞性能的影响很小;增强构件两端的支座约束,可以增强构件的耐撞性能;构件的内外径之比为 0.6~0.8 时,构件具有较好的耐撞性能。

**关键词:** 内配圆钢管的圆钢管混凝土; 横向撞击; 动力响应; 耐撞性能; 参数分析

中图分类号: TH212; TH213.3

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.09.017

## Anti-impact performance analysis for circular CFST members with inner circular steel tube

SHI Yanli<sup>1,2</sup>, HE Jiaying<sup>2</sup>, WANG Wenda<sup>2</sup>, XIAN Wei<sup>2</sup>, WANG Rui<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** A circular concrete-filled steel tubular (CFST) member with inner circular steel tube is a new type of combination one in a composite form. It means that a smaller circular steel tube is placed in a larger one with the same geometric axis, and concrete is filled in the inner steel tube and the space between the two tubes. A finite element (FE) model was developed using the software ABAQUS to simulate anti-impact performance of the circular CFST member with inner circular steel tube under low velocity transverse impact. The numerical simulation results were compared with other researchers' test results for CFST members and concrete-filled double skin tubular (CFDST) members, respectively to verify the correctness of the FE model. The FE model was used to analyze the whole process of dynamic response and typical failure modes for this type of combination members under transverse impacting load. The main parameters affecting their anti-impact performance were analyzed. Parametric analysis results showed that increase in strength and steel ratio of outer steel tube can effectively improve the anti-impact performance of this type of combination members while concrete strength has a little effect on their anti-impact performance; strengthened constraints at their two ends can also improve their anti-impact performance; when their inner tube to outer one diameter ratio is 0.6~0.8, they have a better anti-impact performance.

**Key words:** circular concrete-filled steel tubular (CFST) member with inner circular steel tube; transverse impact; dynamic response; anti-impact performance; parametric analysis

基金项目: 国家自然科学基金(51768038; 51268035); 甘肃省高等学校协同创新团队(2018C-08)

收稿日期: 2017-08-29 修改稿收到日期: 2018-01-26

第一作者 史艳莉 女, 博士, 副教授, 1977 年生

通信作者 王文达 男, 博士, 教授, 1976 年生

工程结构在全寿命周期的正常使用阶段,面临着撞击荷载导致的偶然灾害的风险,如脱轨列车对站房结构的撞击,船只对桥梁及海上钻井平台的意外冲撞等。这些灾害一旦出现往往具有很大的破坏力,但是事先又难以预测,故严重威胁着结构在使用阶段的安

全性。鉴于此,以提高耐撞性能为目标的新型复合结构在工程设计领域里受到了高度重视。

内配圆钢管的圆钢管混凝土是在普通圆钢管混凝土截面内部配置圆钢管形成的一种新型组合形式,可在不增加截面尺寸的情况下进一步增加对核心混凝土的约束效果,改善构件的受力性能,和普通钢管混凝土构件相比具有更高的承载力和抗震性能,更适应于重载等环境,其典型截面如图1所示。需要说明的是,本文所研究的内配圆钢管的圆钢管混凝土构件和中空夹层圆钢管混凝土构件构造不同,中空夹层钢管混凝土构件中内钢管内为未浇筑混凝土的空心构造,而本文内配圆钢管的圆钢管混凝土构件的内钢管内部浇筑有混凝土。

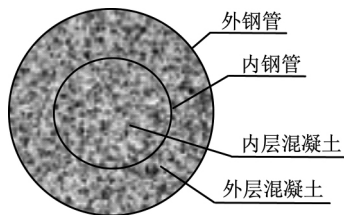


图1 构件截面形式示意图

Fig. 1 Cross section of the member

关于内配圆钢管的圆钢管混凝土结构的早期的研究可以追溯到上个世纪末期<sup>[1]</sup>,以轴压力学性能试验研究<sup>[2-3]</sup>及采用理论分析及数值模拟的研究方法,对影响其承载能力的主要因素进行了分析,并得出其轴压承载力的计算方法<sup>[4-6]</sup>等。

目前对钢管混凝土结构在撞击作用下的力学性能已经进行了大量的试验研究、理论分析和有限元模拟,并积累了不少的研究成果。张望喜等<sup>[7]</sup>在轻气炮试验装置上对8个钢管混凝土构件进行了冲击试验;王蕊等<sup>[8]</sup>以试验研究和理论分析相结合的方法,研究了钢管混凝土在侧向冲击下的动力响应;郑秋等<sup>[9]</sup>对15个钢管混凝土在不同温度下的抗冲击性能进行了试验研究;任晓虎等<sup>[10]</sup>通过试验进一步研究了钢管混凝土在高温作用后的抗冲击性能,并提出了高温后钢管混凝土简化的DIF计算方法;余敏等<sup>[11]</sup>对钢管混凝土柱在汽车撞击作用下的动力响应进行有限元模拟,并给出了等效冲击力计算公式;霍静思等<sup>[12]</sup>进行了13个钢管混凝土短柱在ISO-834标准火灾作用下的抗冲击性能试验;任晓虎等<sup>[13]</sup>采用落锤冲击试验机 and 高温试验炉,进行了4根钢管混凝土梁在火灾作用下的抗冲击试验研究;侯川川在重型超高落锤试验机上完成了12个大尺寸圆钢管混凝土试件的落锤冲击试验;章琪等<sup>[15]</sup>通过有限元模拟,数据拟合得出了构件受撞击后剩余受压承载力降低系数的计算公式。

近年来对于FRP-钢管混凝土结构、中空夹层钢管

混凝土等新型组合结构构件的耐撞性能的研究已有不少研究,如陈忱等<sup>[16]</sup>用有限元方法研究发现利用FRP加固的方法可以有效地提高钢管混凝土构件的抗冲击刚度;Wang等<sup>[17]</sup>进行了18个FRP-钢管混凝土构件的抗冲击试验;Wang等<sup>[18]</sup>利用落锤试验装置对31个圆锥形中空钢管混凝土构件的冲击性能进行了试验研究;朱翔等<sup>[19]</sup>对三种不同截面形式的新型复合柱进行了抗冲击试验及数值模拟,为抗冲击结构选择最优截面及进行抗冲击分析选取合适的有限元分析软件提供参考;姜珊等<sup>[20]</sup>利用落锤冲击试验机完成了6组中空夹层不锈钢钢管混凝土构件的侧向撞击试验。王宇等<sup>[21]</sup>利用落锤试验,进行了7个双层钢管混凝土试件在多次冲击作用下的试验研究。贾志路等<sup>[22]</sup>对9根箱形钢管混凝土叠合柱进行了抗冲击试验研究。邹森等<sup>[23]</sup>对FRP-混凝土-钢管组合结构进行了有限元分析,并分析了其在撞击作用下的力学性能。侯川川指出当撞击物体质量相对较大,冲击速度相对较低,撞击时间相对较长,遭受撞击的结构主要发生整体变形,而未产生局部侵彻时为低速撞击。建筑结构遭受车辆、船只等的撞击为低速撞击过程。在本文的研究范围内,撞击荷载均属于低速撞击。

本文在ABAQUS软件平台上建立了内配圆钢管的圆钢管混凝土构件受到低速横向撞击作用的有限元分析模型,并与已有的钢管混凝土及中空夹层钢管混凝土构件撞击试验数据对比,验证了模型的有效性。采用该模型分析了此类组合构件在低速横向撞击作用下的动力响应全过程及其破坏模式,并对影响其耐撞性能的参数进行分析,得出了各个参数对构件耐撞性能的影响,以为工程实际提供参考。

## 1 有限元模型

### 1.1 模型的建立

基于ABAQUS软件平台模拟两端固支的内配圆钢管的圆钢管混凝土构件在落锤撞击作用下的瞬态行为,撞击部位为跨中。采用软件中的显示动力学模块ABAQUS/Explicit建模计算,建模时需要选取合理的材料模型。其中,钢材的本构模型采用韩林海<sup>[24]</sup>提出的五段式的弹塑性本构模型。考虑动力加载下钢材的应变率效应,使用Cowper-Symonds模型进行计算,如式(1)所示

$$\sigma_d/\sigma_s = 1 + (\dot{\epsilon}/D)^{1/p} \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为钢材的应变率, $\sigma_d$ 为钢材应变率为 $\dot{\epsilon}$ 时的应力值, $\sigma_s$ 为钢材在静力下的应力值, $D$ 和 $p$ 为材料参数,取 $D=6\ 844\ \text{s}^{-1}$ , $p=3.91$ 。

混凝土的本构模型采用ABAQUS中塑性损伤模型,其中材料单轴受拉和受压的应力-应变关系均采用

文献 [24] 里的模型, 并且考虑到动力加载下混凝土的应变率效应, 根据文献 [14] 对此模型进行修正后使用。

建模时内外层混凝土采用三维实体单元 (C3D8R) 模拟, 外钢管和内置钢管均采用三维壳单元 (S4R) 模拟; 落锤选用刚体 rigid 模型。试件固支的边界条件施加在试件两端端部的钢管和混凝土上, 通过约束试件两端端面所有方向的位移来实现。

有限元计算结果与网格密度息息相关, 模型的网格划分越密, 计算精度越高, 但是网格太密会影响计算效率。考虑到计算该模型耗时较短, 更加倾向于保证计算的精度, 故对整个模型划分网格时采用了较密的网格划分。为了保证网格生成的质量, 进行网格划分时采用结构化的网格划分技术, 模型典型的网格划分及边界条件如图 2 所示。落锤位置设置在构件附近, 以定义落锤初速度的方法在预定义场中施加撞击荷载。考虑到重力作用的影响, 在整个模型施加重力加速度。

混凝土与内外钢管及外钢管与落锤的界面接触均采用“通用算法”模块定义, 所有接触面的法线方向均采用硬接触, 切线方向则采用库伦摩擦模型来模拟。其中, 钢管-混凝土界面的切线库伦摩擦因数采用韩林海建议的 0.6, 界面平均黏结力也采用韩林海建议的公式计算, 如式 (2) 所示。钢管-落锤界面的切线库伦摩

擦因数为 0。

$$\tau_{\text{bond}} = 2.314 - 0.0195 \cdot (D/t_s) \quad (2)$$

式中:  $\tau_{\text{bond}}$  的单位为 N/mm;  $D$  为圆截面构件核心混凝土直径,  $t_s$  为外钢管厚度。

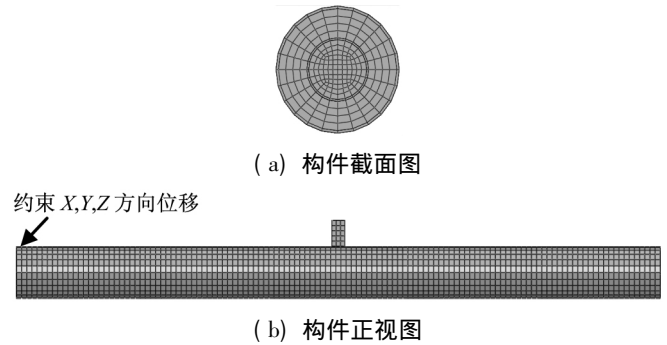


图 2 构件网格划分及边界条件示意图

Fig. 2 Boundary conditions and element division

### 1.2 模型的验证

为验证有限元模型的有效性和适用性, 根据已有研究者完成的钢管混凝土、中空夹层钢管混凝土试件的落锤撞击试验, 采用试验中的落锤高度、重量、试件尺寸及试验中得到的钢管和混凝土的材料参数, 进行有限元数值模拟, 并将同工况下计算得到的冲击力时程曲线和跨中最终挠度与试验所得的结果进行了对比, 部分典型试验试件的计算结果如图 3 所示。表 1 则给出了上述试验试件的详细参数。

表 1 组合构件落锤撞击试验参数一览表

Tab. 1 Summary of composite members subjected to falling hammer impact

试件类型	编号	$D(B) \times t \times L$ (mm) 或 $D_o \times D_i \times t_o \times t_i \times L$	边界条件	冲击高度/m	初速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	冲击能量/ kJ	数据来源
钢管混凝土	CC1	180 × 3.65 × 1 940	两端固支	5.5	9.21	19.7	侯川川 <sup>[14]</sup>
	CC2	180 × 3.65 × 1 940	两端固支	2.5	6.40	18.8	
	CS1	180 × 3.65 × 2 400	固简支	5.0	9.00	18.8	
	CS3	180 × 3.65 × 2 400	固简支	4.0	7.97	14.8	
	SS1	180 × 3.65 × 2 800	两端简支	4.0	8.05	15.1	
	SS3	180 × 3.65 × 2 800	两端简支	5.0	8.93	18.5	王蕊等 <sup>[8]</sup>
	DZF22	114 × 3.5 × 1 200	两端固支	3.0	7.75	6.9	
	DZF26	114 × 3.5 × 1 200	两端固支	7.0	11.80	16.1	
	DHF35	114 × 4.5 × 1 200	两端固支	6.0	11.00	13.8	
	DHF39	114 × 4.5 × 1 200	两端固支	7.0	11.80	16.1	
中空夹层钢管 混凝土	S50CSL	114 × 48 × 2.0 × 1.8 × 1 200	两端固支	3.0	7.60	5.9	姜珊等 <sup>[20]</sup>
	S76CSH	114 × 76 × 2.0 × 1.6 × 1 200	两端固支	7.0	11.70	14.0	

图 3 所示为表 1 中所选取的典型工况下的部分试件冲击力时程曲线计算值和试验值的对比。可以看出, 两者的冲击力峰值及其整体变化趋势均大致相同。且从图 3 的冲击力时程曲线的变化趋势可以看出, 冲击力在撞击后迅速达到峰值 ( $F_p$ ), 经过短暂的调整之后在一段时间内基本不变, 形成一个平台段, 以该平台段的平均值作为冲击力平台值 ( $F_0$ ), 试件完成横向撞击之后测得的试件跨中挠度为跨中最终挠度 ( $U_m$ ), 图

4 给出了各试件平台值 ( $F_0$ )、冲击时间 ( $t_0$ ) 和跨中最终挠度 ( $U_m$ ) 的计算值和实测值的对比。其中  $F_{0c}/F_{0e}$ 、 $t_{0c}/t_{0e}$ 、 $U_{mc}/U_{me}$  的平均值分别为 1.02、0.97 和 0.95, 均方差分别为 0.05、0.07 和 0.06。可见有限元计算结果与试验结果总体上吻合良好, 因此本文有限元模型可用于内配圆钢管的圆钢管混凝土构件的耐撞性能的分析。

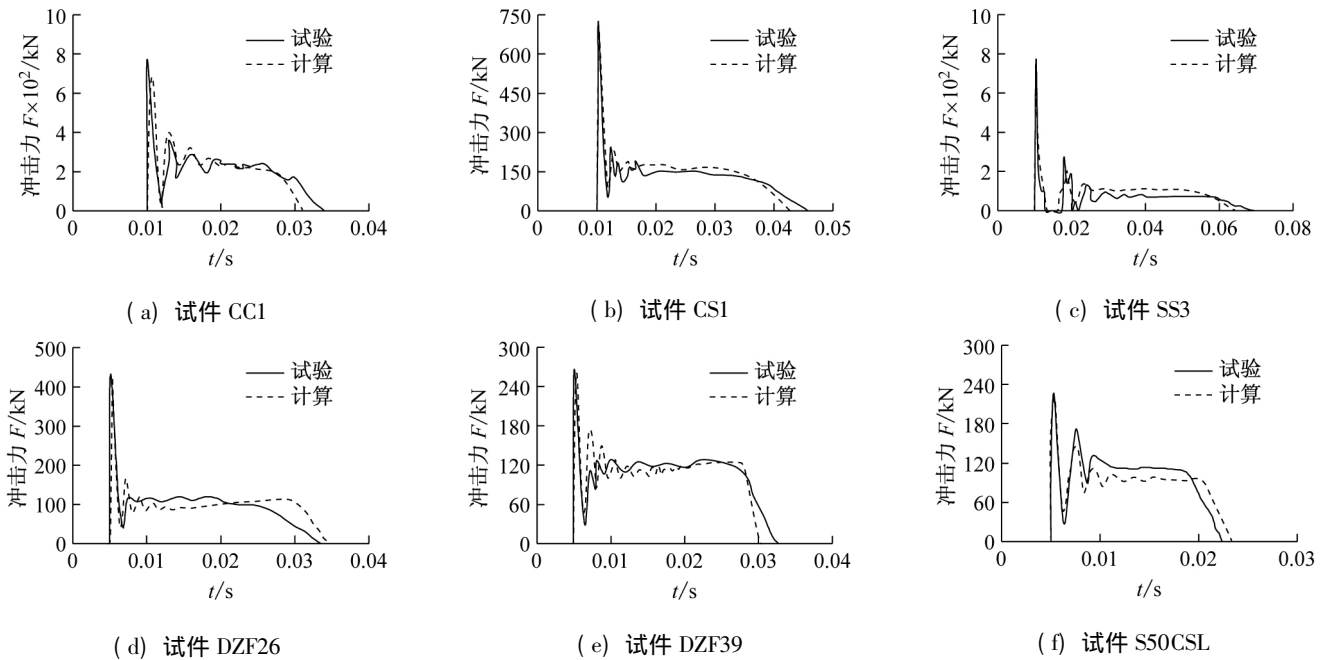


图3 试验与数值计算的冲击力时程曲线的比较

Fig. 3 Comparison of impact-time history curves between tested and calculated result

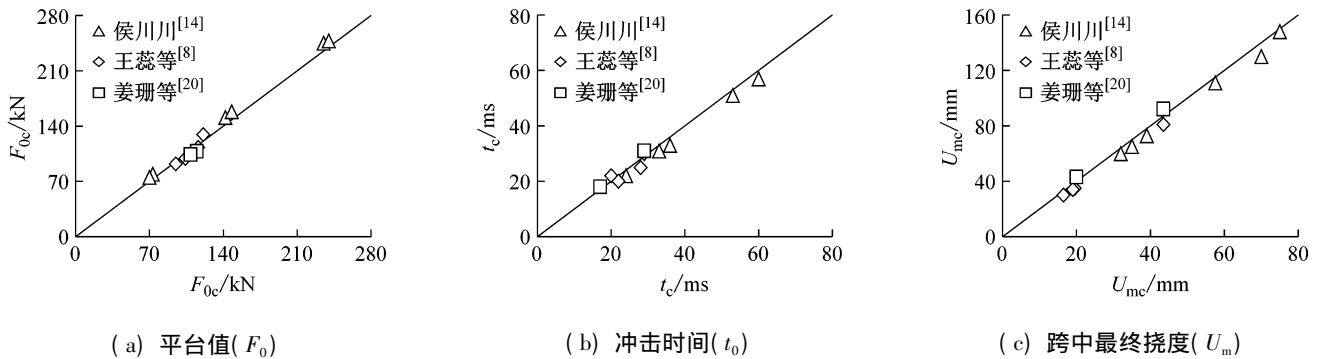


图4 构件平台值( $F_0$ )、冲击时间( $t_0$ )和跨中最终挠度( $U_m$ )的实测值和计算值的对比

Fig. 4 Comparisons between the plateau values ( $F_0$ ), load durations ( $t_0$ ) of the impact forces and the mid-span deflections ( $U_m$ )

## 2 撞击受力全过程分析

采用上述建模方法建立内配圆钢管的圆管混凝土构件横向撞击下典型的有限元分析模型,典型构件基本参数为:试件长度 2 500 mm,外钢管的外径 200 mm,壁厚 4 mm,内置钢管外径 100 mm,壁厚 3 mm,钢材强度等级为 Q235,混凝土强度等级为 C60,落锤质量 1 000 kg,冲击高度 4.5 m,轴压比为 0。

### 2.1 冲击力和变形发展过程

为了能够在宏观上反映构件在撞击作用下动力响应的全过程,以选定的典型构件为分析对象,给出了其在撞击过程中的一些特征量的时程曲线,为了便于分析及能够表现出这些特征量之间的对应关系,所以对特征量进行了无量纲处理,并在一张图中呈现。图 5 所示即为通过无量纲处理的典型构件的冲击力( $F$ )、跨中挠度( $\Delta$ )、撞击部位局部凹陷值( $\delta$ )、构件跨中速度( $V_0$ )和落锤速度( $V_1$ )时程曲线。其中局部凹陷

值( $\delta$ )相比于跨中挠度值很小,将其扩大了二十倍。

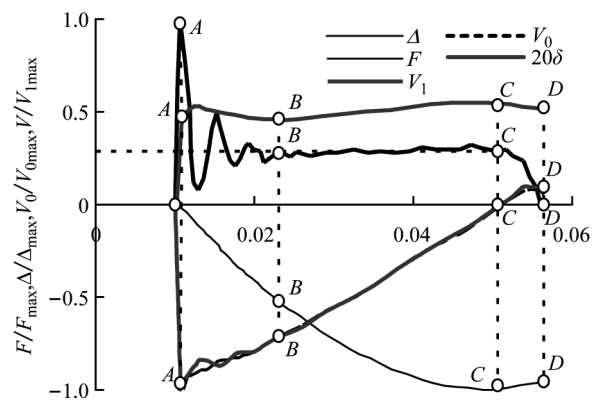


图5 冲击力( $F$ )、跨中挠度( $\Delta$ )、局部变形值( $\delta$ )及速度( $V_0/V_1$ )时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of impact force ( $F$ ), lateral deflection ( $\Delta$ ), the local deformation ( $\delta$ ), velocity ( $V_0/V_1$ )

整体来看,可将构件受到横向撞击的过程分为以

下四个阶段:

峰值段(OA段):当落锤撞击到试件时,冲击力迅速上升,落锤的速度随之降低,试件的跨中速度则迅速增大,当冲击力达到峰值(A点)时,两者的速度趋向一致,并且相互接触一致向下运动。在这阶段,试件在撞击部位出现明显的凹陷变形,构件的跨中挠度有所发展。

振荡段(AB段):在达到冲击力峰值之后,试件的速度继续增大,落锤的速度相对较小,两者之间的接触关系变弱,从而使冲击力迅速下降。之后试件的速度逐渐降低,落锤的速度相对较大,使两者之间的接触关系增强,从而使得冲击力再次上升,如此往复,直至两者的速度基本达到一致(B点),冲击力基本保持不变为止。在这阶段,试件撞击部位的局部凹陷值略有降低,试件的跨中挠度逐渐增大。

平台段(BC段):冲击力至此进入稳定阶段,值几乎保持不变。试件和落锤基本保持匀减速向下运动,其中落锤速度要略大于试件的速度,从而使得撞击部位局部凹陷值在这个阶段缓慢增大,但增值不大。到该阶段结束时,两者的速度均下降为零(C点),试件的挠度达到最大值。

卸载段(CD段):冲击力开始下降,落锤和试件的速度开始向负值变化,试件的跨中挠度及局部凹陷值略有降低。即试件停止向下运动,开始向上回弹,从而带动落锤和试件向上运动。到该阶段结束时,冲击力下降为零(D点),试件和落锤脱离,冲击过程结束。

### 2.2 能量变化

在撞击过程中,落锤动能一部分传递给了构件,另一部分转化成构件的弹性应变能和塑性应变能,随着撞击过程的进行,构件的动能和弹性应变能基本降低为零,试件最终的塑性应变能接近落锤的初动能。图6所示为内配圆钢管的圆钢管混凝土构件的塑性应变能时程曲线,并给出了内外钢管及内外层混凝土分别的

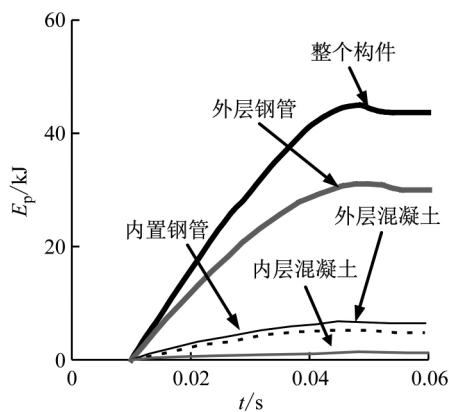


图6 组合构件各部分承担的塑性应变能时程曲线

Fig. 6 Time-history Energy dissipation ( $E_p$ ) of the different components of the composite member

耗能曲线。由图可以看出,落锤撞击试件的过程中,试件产生的塑性变形不断消耗撞击能量(即落锤的动能),其中,钢管的塑性耗能占了构件塑性变形耗能的80%左右,混凝土耗能占了20%左右,且外钢管占比约70%。表明钢管的塑性变形是内配圆钢管的圆钢管混凝土主要的耗能机制,且外钢管对构件的塑性耗能贡献最大。内外层混凝土对构件的塑性耗能不大,但是由于内外层混凝土的支撑作用,使钢管的塑性发展充分,耗能能力得到提升。

### 3 破坏模态分析

图7所示为在低速撞击下典型内配圆钢管的圆钢管混凝土构件内外钢管的等效塑性应变图,等效塑性应变(PEEQ)是整个变形过程中塑性应变的积累结果,若其值大于0则表明钢管发生了屈服。可以直观地看出,内外钢管除冲击部位及两端支座处发生屈服外,其余部位均未发生屈服,即形成了三处塑性铰。其中跨中底部对应的应变数值最大,表明了跨中底部是最先发生塑性破坏的地方。

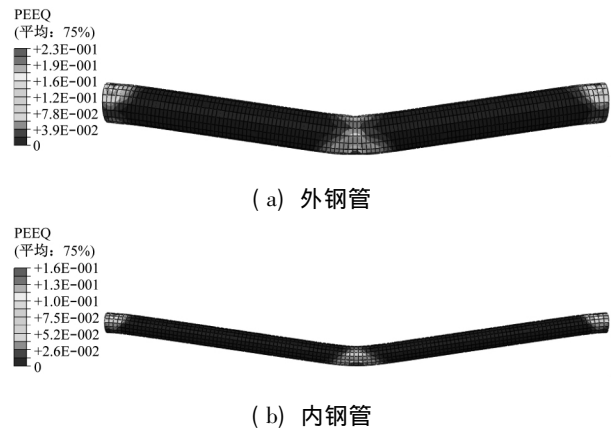


图7 钢管典型破坏模态

Fig. 7 Typical failure modes of the steel tube

图8所示为典型内配圆钢管的圆钢管混凝土构件内外层混凝土的最大主塑性图。图中箭头方向表示混凝土最大主塑性应变方向,与该箭头垂直的方向即为混凝土可能的受拉开裂方向。箭头长度表示的是其最大主塑性应变的大小,箭头越长,塑性应变数值越大。可以看出,箭头出现的区域集中在跨中和两端的

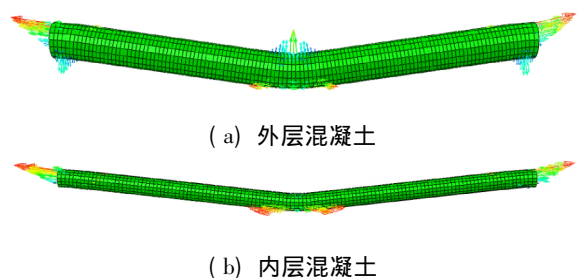


图8 混凝土典型破坏模态

Fig. 8 Typical failure modes of the concrete

固支支座处,即在这三处的混凝土在撞击荷载作用下因弯矩作用产生开裂裂缝,而其余部位塑性应变很小,混凝土几乎不发生开裂。

从以上对钢管和混凝土的破坏模态分析可知,两端固支的内配圆钢管的圆钢管混凝土构件在撞击荷载下发生了明显的弯曲变形,跨中和两端支座处形成了三个塑性铰,试件其余部分基本保持为直线,变形不明显。由于内外层混凝土及内钢管的支撑作用,跨中部位外钢管的塑性发展充分,局部凹陷并不明显。混凝土的破坏集中在跨中及两端支座处,但由于内外钢管的保护作用及内钢管对外层混凝土的骨架效应,使得内外层混凝土不会发生严重的开裂和破碎。撞击过程中,内外钢管和内外层混凝土共同工作,协同变形,最终表现出塑性变形形态。

#### 4 参数分析

采用以上的有限元建模方法,对影响内配圆钢管的圆钢管在横向撞击下的力学性能的主要因素进行参数分析。主要参数包括:内外钢管的屈服强度、混凝土强度、内外径的比值、外钢管含钢率、内钢管含钢率、撞击位置、边界条件、冲击能量等。力学性能主要用冲击力时程曲线和跨中最终挠度曲线来衡量。

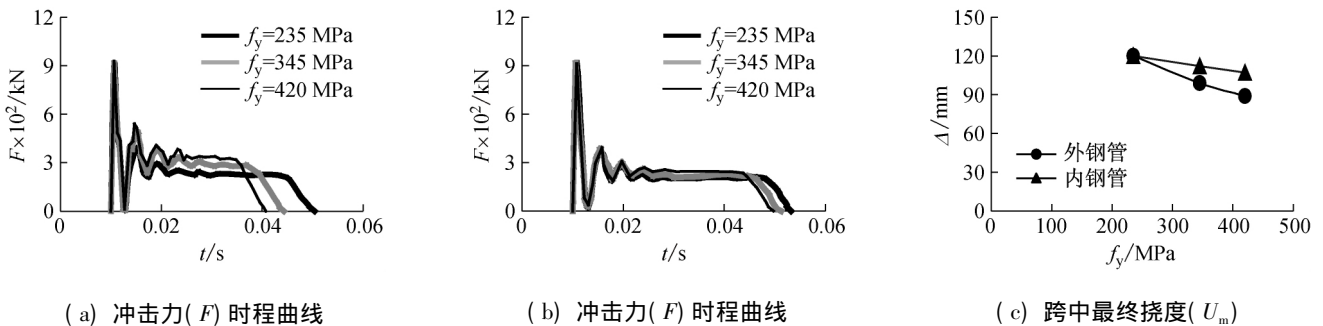


图9 内外钢管不同屈服强度下冲击力时程曲线及其跨中最终挠度( $U_m$ )对比曲线

Fig. 9 Time-history curves of impact force ( $F$ ) of different yield strength of the outer and inner steel tube and comparison of the final mid-span deflections ( $U_m$ ) between the outer and inner steel tube

#### 4.2 混凝土强度( $f_{cu}$ )

为研究混凝土强度对构件的耐撞性能的影响,在工程常用范围内( $f_{cu} = 20 \sim 90 \text{ MPa}$ )模拟了混凝土强度分别为  $30 \text{ MPa}$ 、 $50 \text{ MPa}$ 、 $70 \text{ MPa}$  时的撞击过程。图 10(a) 所示为混凝土强度对冲击力时程曲线的影响,可以看出,三条冲击力时程曲线几乎完全重合,说明改变混凝土强度对冲击力平台值及峰值影响很小。图 10(b) 所示为三种混凝土强度下的跨中最终挠度曲线,由图可知,混凝土强度对跨中最终挠度的影响也很小。由此可知,混凝土强度的变化对构件耐撞性能的影响很小。

#### 4.1 内外钢管的屈服强度( $f_y$ )

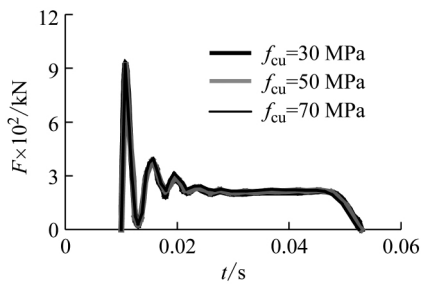
为了研究外钢管屈服强度对内配圆钢管的圆钢管混凝土构件耐撞性能的影响,在工程常用范围内( $f_y = 200 \sim 700 \text{ MPa}$ )选取 3 组不同屈服强度的钢材进行模拟计算,分别为 Q235、Q345、Q420。计算时控制其他变量值不变,仅改变外钢管屈服强度。内钢管的研究方法同上。

图 9(a) 所示为外钢管的屈服强度对冲击力时程曲线的影响。可以看出,随着外钢管屈服强度的提高,构件冲击力时程曲线的平台值相应增大,同时冲击持续时间减少,而对冲击力峰值影响不大。图 9(b) 所示为内钢管的屈服强度对冲击力时程曲线的影响。由图可知,提高内钢管的强度与提高外钢管的屈服强度相比,冲击力时程曲线的变化规律一致,但对其影响不如提高外钢管屈服强度那样明显。图 9(c) 所示为内外钢管在不同屈服强度下的跨中最终挠度对比曲线。可以看出,随着内外钢管的屈服强度的提高,构件的跨中最终挠度都相应降低,且改变外钢管的屈服强度所引起的挠度变化幅度比较大。由此可知,提高内外钢管的屈服强度可以改善该构件的耐撞性能,且外钢管的屈服强度的提高对其耐撞性能的影响更为显著。

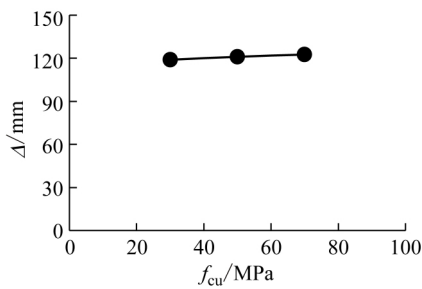
#### 4.3 钢管内外径的比值( $D_i/D_o$ )

保持内钢管的含钢率不变,通过改变内钢管的直径来改变内外径的比值,内外径之比( $D_i/D_o$ )变化范围为  $0.4 \sim 0.8$ 。图 11 所示为内外径之比对构件的冲击力时程曲线和跨中最终挠度曲线的影响。由图可知,内外径之比的变化对冲击力时程曲线的影响较小,而对跨中最终挠度的影响较大。具体体现在随着内外径之比的变大,冲击时间变短,冲击力的平台值和峰值有增大的趋势,但是变化不明显。构件的跨中最终挠度随内外径之比的变大而减小,且在内外径之比为  $0.6 \sim 0.8$  区间时的挠度下降的幅度比  $0.4 \sim 0.6$  区间大很

多,这是因为随着内外径之比的增大,内配圆钢管的圆管混凝土的内钢管的骨架效应得到增强,从而使撞击后的试件的塑性变形减小。由此可知,提高内外径之比可以提高耐撞性能,且在内外径之比为0.6~0.8时对耐撞性能的影响更为显著。



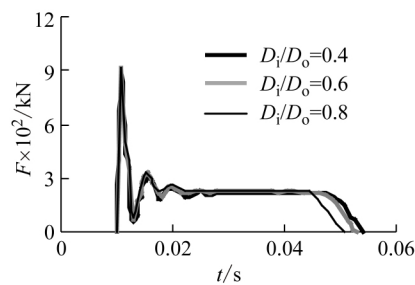
(a) 冲击力(F) 时程曲线



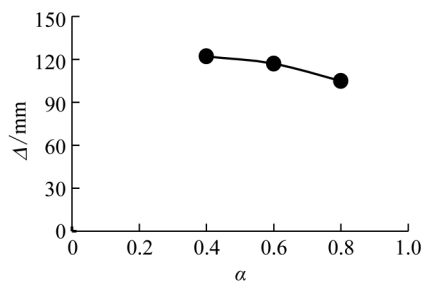
(b) 跨中最终挠度(U\_m)

图10 不同混凝土强度下冲击力时程曲线及其跨中最终挠度(U\_m) 曲线

Fig. 10 Time-history curves of impact force (F) of different concrete strength and the final mid-span deflections (U\_m) curves



(a) 冲击力(F) 时程曲线



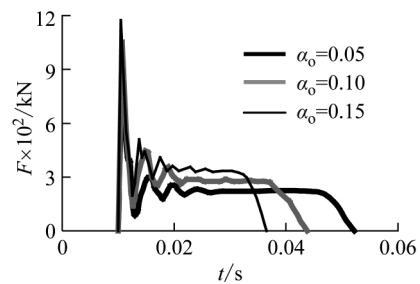
(b) 跨中最终挠度(U\_m)

图11 不同内外径之比下冲击力(F) 时程曲线及其跨中最终挠度(U\_m) 曲线

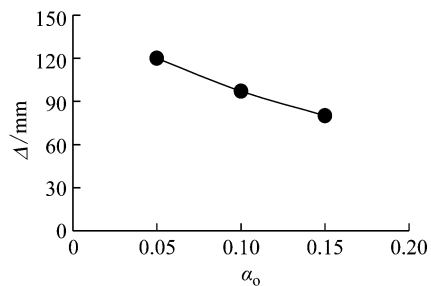
Fig. 11 Time-history curves of impact force (F) of different ratios of inner diameter to outer diameter and the final mid-span deflections (U\_m) curves

### 4.4 外钢管的含钢率(α\_o)

保持外钢管的外径不变,改变外钢管的厚度来调整外钢管的含钢率,在工程常用的参数范围内(α\_o = 0.03~0.2),研究外钢管含钢率对构件耐撞性能的影响。选取三组外钢管厚度值,分别为2.2 mm、4.5 mm、6.8 mm,对应外钢管含钢率为0.05、0.10、0.15。由图12(a)的冲击力时程曲线可以看出,随外钢管的含钢率的增大,冲击力的峰值和平台值都显著提高,且冲击时间明显缩短。图12(b)的跨中最终挠度曲线反映出随外钢管含钢率的增大,构件的跨中最终挠度明显下降,这是由于外钢管含钢率的增大,外钢管对混凝土的套筒作用增强,构件的整体刚度得到了显著的提高,使得试件的变形减小。由此可知,增加外钢管含钢率可以有效地提高构件的耐撞性能。



(a) 冲击力(F) 时程曲线



(b) 跨中最终挠度(U\_m)

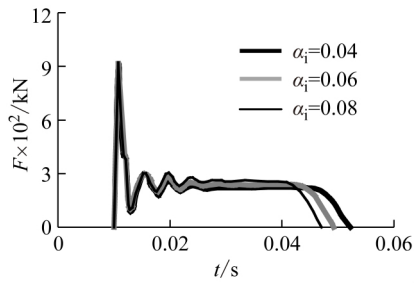
图12 不同外钢管含钢率下冲击力时程曲线及其跨中最终挠度(U\_m) 曲线

Fig. 12 Time-history curves of impact force of different the outer steel tube ratios and the final mid-span deflections (U\_m) curves

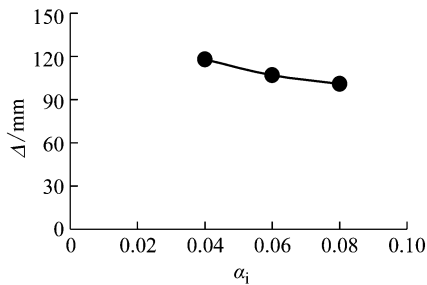
### 4.5 内钢管的含钢率(α\_i)

保持内钢管的外径不变,通过改变内钢管的厚度来改变内钢管的含钢率。选取了三组内钢管厚度值分别为3.6 mm、5.4 mm、7.0 mm,对应内钢管含钢率为0.04、0.06、0.08。图13所示为内钢管含钢率对构件的冲击力时程曲线和跨中最终挠度曲线的影响。由图可知,随着内钢管含钢率的增大,构件冲击力峰值和平台值增大,冲击时间缩短,构件的跨中最终挠度逐渐下降,显示出内钢管的含钢率对构件的耐撞性能有较大的影响:随着内钢管含钢率的提高,构件的耐撞性能增强。这是由于内钢管的含钢率的增加,内钢管对外层

混凝土的支撑作用及对内层混凝土的约束作用增强,使得构件的整体刚度有所提高,从而提升了构件的耐撞性能。



(a) 冲击力( $F$ ) 时程曲线



(b) 跨中最终挠度( $U_m$ )

图13 不同内钢管含钢率下冲击力时程曲线及其跨中最终挠度( $U_m$ ) 曲线

Fig. 13 Time-history curves of impact force of different the inner steel tube ratios and the final mid-span deflections ( $U_m$ ) curves

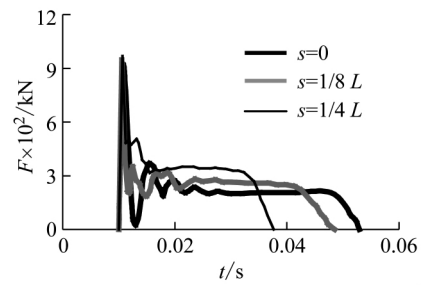
#### 4.6 撞击位置

改变落锤在构件上的撞击位置,研究其对构件耐撞性能的影响。 $s$ 表示撞击部位与跨中的距离,选取了 $s$ 分别为 $0$ 、 $1/8L$ 、 $1/4L$ ,对应撞击位置为跨中、距离跨中 $1/8L$ 处,距离跨中 $1/4L$ 处。图14所示为在这三处位置发生撞击时构件的冲击力时程曲线和跨中挠度曲线。由图14(a)可知,随着撞击部位远离跨中,冲击力峰值变化不大,而冲击力平台值明显提高,冲击时间缩短。跨中最终挠度也随之下降,且下降有加快的趋势。由此可知,跨中部位是遭受撞击最不利部位,且随着撞击部位与跨中的距离越远,耐撞性能的提升越显著。

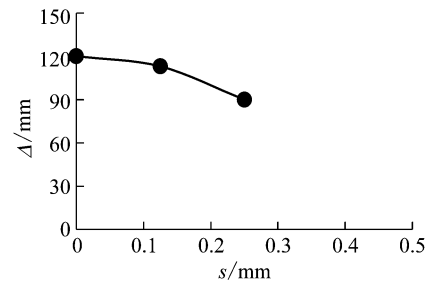
#### 4.7 撞击能量( $E$ )

保持落锤质量不变,改变落锤下落高度来控制撞击能量的大小,撞击能量的变化范围为 $15 \sim 60$  kJ。图15(a)所示为撞击能量对两端固支的构件的冲击力时程曲线的影响。可以看出,撞击能量越大,冲击力峰值增大,冲击时间增加,冲击力平台值有所提高。由图15(c)可见,在三种边界条件下,构件的跨中挠度都随着撞击能量的增大而显著增大,而且两者之间成线性关系,这是因为随着撞击能量的增大,构件的塑性变形所需要消耗的能量增大,使得塑性变形增大,且根据能量守恒定律可以得出,跨中最终挠度与落锤的下落高度

成正比例关系。



(a) 冲击力( $F$ ) 时程曲线



(b) 跨中最终挠度( $U_m$ )

图14 不同部位撞击下冲击力时程曲线及其跨中最终挠度( $U_m$ ) 曲线

Fig. 14 Time-history curves of impact force of different positions of the component and the final mid-span deflections ( $U_m$ ) curves

#### 4.8 边界条件

改变构件两端的约束类型,研究构件在两端固支(F F)、固简支(F S)、两端简支(S S)三种边界条件下的耐撞性能的变化。图15(b)所示为三种边界条件下构件的冲击力时程曲线的对比。由图可知,随着边界条件的增强,冲击力的峰值略有提高,冲击力平台值随之增大,冲击时间则随之减小。由图15(c)可以看出,跨中最终挠度随着边界条件的增强而减小。由此可知,随着构件的边界条件增强,构件的耐撞性能增强。这是由于边界条件增强,构件可以在固支端形成塑性铰,从而提高了构件的耐撞性能。

#### 5 结论

通过本文的研究,对于内配圆钢管的钢管混凝土构件的撞击性能分析,可初步得到以下结论:

(1) 用 ABAQUS 建立内配圆钢管的圆钢管混凝土构件在横向撞击下的有限元分析模型,采用已有的相关试验数据对模型进行验证,表明本文模型可用于内配圆钢管的圆钢管混凝土构件耐撞性能分析。

(2) 整体来看内配圆钢管的圆钢管混凝土构件的撞击过程分为四个阶段:峰值段、振荡段、平台段、卸载段,且平台段是构件塑性发展的主要阶段。构件在撞击荷载作用下的主要耗能机制是内外钢管和内外层混凝土的塑性变形,其中外钢管的塑性变形是主要的耗



能部位,而内层混凝土的耗能最少。

(3) 两端固支的内配圆钢管的圆钢管混凝土构件在撞击荷载下发生了明显的弯曲变形,跨中和两端支座处形成了三个塑性铰,试件其余部分基本保持为直线,变形不明显。撞击过程中内外钢管和内外层混凝土共同工作,协同变形,最终表现出塑性变形形态。

(4) 参数分析表明,提高外钢管的屈服强度及外钢管含钢率可以有效地改善该构件的耐撞性能,而混凝土强度的变化对构件耐撞性能的影响很小;增强构件两端的支座约束可增强构件耐撞性能;构件的内外钢管直径之比为0.6~0.8时,具有较好的耐撞性能。

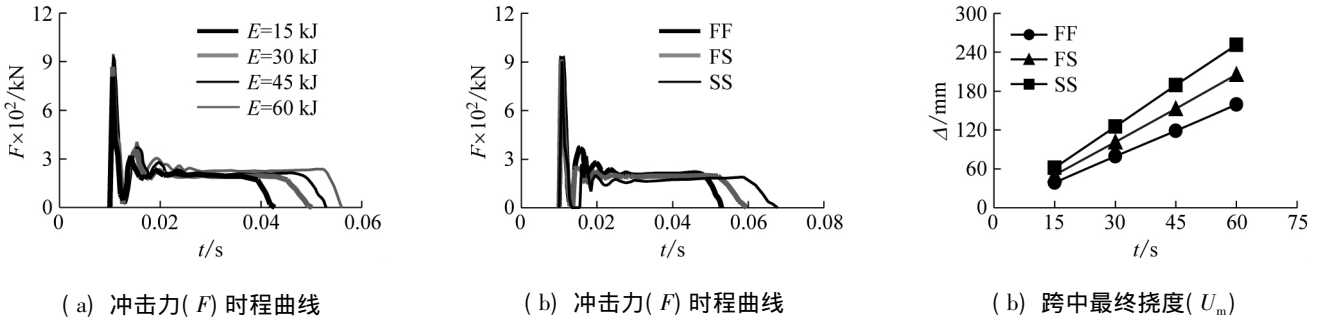


图 15 边界条件和冲击能量对冲击力时程曲线的影响及其跨中最终挠度 (U<sub>m</sub>) 对比曲线

Fig. 15 Influence of boundary conditions and impact energy on time-history curves of impact force (F) of different impact energy and comparison of the final mid-span deflections (U<sub>m</sub>)

参考文献

[1] 蔡绍怀,焦占拴. 复式钢管混凝土柱的基本性能和承载力计算[J]. 建筑结构学报,1997,18(6): 20-25.  
CAI Shaohuai, JIAO Zhanshuan. Behavior and ultimate load analysis of multibarrel tube confined concrete columns [J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(6): 20-25.

[2] 张春梅,阴毅,周云. 双钢管高强混凝土柱轴压承载力的试验研究[J]. 广州大学学报(自然科学版) 2004,3(1): 61-65.  
ZHANG Chunmei, YIN Yi, ZHOU Yun. Experiment study on the axial load-bearing capacity of high-strength concrete-filled double tube elements [J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2004, 3(1): 61-65.

[3] 江韩,储良成,左江,等. 轴心受压双钢管混凝土短柱正截面受压承载力理论分析及试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008,29(4): 29-38.  
JIANG Han, CHU Liangcheng, ZUO Jiang, et al. Theoretical analysis and experimental study on normal cross-section load-carrying capacity for concrete-filled double steel tubular short columns subjected to axial compression load [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 29-38.

[4] 张玉芬,赵均海,李小伟. 基于统一理论的复式钢管混凝土轴压承载力计算[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版) 2009,41(1): 41-46.  
ZHANG Yufen, ZHAO Junhai, LI Xiaowei. On axial bearing capacity of composite concrete-filled steel tubes based on unified theory [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2009, 41(1): 41-46.

[5] 李宁波,钱稼茹,纪晓东,等. 应用 OpenSees 计算双钢管高强砼柱的水平力-位移滞回曲线[J]. 防灾减灾工程学报, 2014,34(5): 606-612.  
LI Ningbo, QIAN Jiaru, JI Xiaodong, et al. Application of OpenSees on calculating lateral force-displacement hysteretic curves of high strength concrete filled double-tube columns

[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(5): 606-612.

[6] 方小丹,林斯嘉. 复式钢管高强混凝土柱轴压试验研究[J]. 建筑结构学报 2014,35(4): 236-245.  
FANG Xiaodan, LIN Sijia. Axial compressive test of columns with multi barrel tube-confined high performance concrete [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 236-245.

[7] 张望喜,单建华,陈荣,等. 冲击荷载下钢管混凝土柱模型力学性能试验研究[J]. 振动与冲击,2006,25(5): 96-103.  
ZHANG Wangxi, SHAN Jianhua, CHEN Rong, et al. Experimental research on mechanical behaviour of concrete filled steel tubes model under impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(5): 96-103.

[8] 王蕊,李珠,任够平,等. 侧向冲击荷载作用下钢管混凝土梁动力响应的实验和理论研究[J]. 工程力学,2008,25(6): 75-80.  
WANG Rui, LI Zhu, REN Gouping, et al. Studies on dynamic response of concrete filled steel tube under lateral impact loading [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 75-80.

[9] 郑秋,霍静思,陈柏生,等. 不同温度下钢管混凝土冲击力学性能试验研究[J]. 工程力学,2009,26(5): 142-147.  
ZHENG Qiu, HUO Jingsi, CHEN Baisheng, et al. Experimental research on impact behavior of concrete-filled steel tube at elevated temperatures [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 142-147.

[10] 任晓虎,霍静思,陈柏生. 高温后钢管混凝土短柱落锤动态冲击试验研究[J]. 振动与冲击,2011,30(11): 67-73.  
REN Xiaohu, HUO Jingsi, CHEN Baisheng. Dynamic behaviors of concrete-filled steel tubular stub columns after exposure to high temperature [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 67-73.

[11] 余敏,查晓雄. 空心钢管混凝土柱在汽车撞击下的性能

- 研究[J]. 建筑钢结构进展 2011, 13(1): 57-64.
- YU Min, ZHA Xiaocong. Behaviour of solid and hollow concrete filled steel tube columns under vehicle impact [J]. Progress in Steel Building Structures, 2011, 13(1): 57-64.
- [12] 霍静思, 任晓虎, 肖岩. 标准火灾作用下钢管混凝土短柱落锤动态冲击试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 9-20.
- HUO Jingsi, REN Xiaohu, XIAO Yan. Impact behavior of concrete-filled steel tubular stub columns under ISO-834 standard fire [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 9-20.
- [13] 任晓虎, 霍静思, 陈柏生. 火灾下钢管混凝土梁落锤冲击试验研究[J]. 振动与冲击 2012, 31(20): 110-115.
- REN Xiaohu, HUO Jingsi, CHEN Baisheng. Anti-impact behavior of concrete-filled steel tubular beams in fire [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 110-115.
- [14] 侯川川. 低速横向冲击荷载下圆钢管混凝土构件的力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [15] 章琪, 蒋庆, 陆新征. 侧向冲击对钢管混凝土受压承载力影响研究[J]. 结构工程师 2013, 29(3): 59-64.
- ZHANG Qi, JIANG Qing, LU Xinzheng. Lateral impact effects on the compressive strength of concrete filled steel tubes [J]. Structural Engineers, 2013, 29(3): 59-64.
- [16] 陈忱, 赵颖华. FRP 钢管混凝土构件抗冲击性能仿真分析[J]. 振动与冲击 2013, 32(19): 197-201.
- CHEN Chen, ZHAO Yinghua. Simulation for anti-impact performance of concrete-filled FRP-steel tubes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(19): 197-201.
- [17] WANG R, HAN L H, TAO Z. Behavior of FRP-concrete-steel double skin tubular members under lateral impact: experimental study [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 95: 363-373.
- [18] WANG R, HAN L H, ZHAO X L, et al. Experimental behavior of concrete filled double steel tubular (CFDST) members under low velocity drop weight impact [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 97: 279-295.
- [19] 朱翔, 陆新征, 杜永峰, 等. 新型复合柱抗冲击试验研究及有限元分析[J]. 工程力学 2016, 33(8): 158-166.
- ZHU Xiang, LU Xinzheng, DU Yongfeng, et al. Experimental study and finite element analysis of impact resistance of novel composite columns [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 158-166.
- [20] 姜珊, 王蕊. 中空夹层不锈钢钢管混凝土构件的侧向撞击试验及有限元分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(11): 161-167.
- JIANG Shan, WANG Rui. Experiment study and finite element analysis of concrete filled stainless and steel double skin tubes member under lateral impact [J]. Industrial Construction, 2016, 46(11): 161-167.
- [21] 王宇, 钱旭东. 多次侧向冲击下双层钢管混凝土结构的响应分析[J]. 振动与冲击 2017, 36(2): 1-6.
- WANG Yu, QIAN Xudong. Behaviour of concrete filled double skin steel tubes under multiple transverse impacts [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(2): 1-6.
- [22] 贾志路, 王蕊. 侧向冲击下箱形钢管混凝土叠合柱动力响应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增刊1): 165-171.
- JIA Zhilu, WANG Rui. Experimental study on dynamic response of box concrete-encased CFST columns under lateral impact [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(Sup1): 165-171.
- [23] 邹淼, 王蕊. 侧向撞击荷载下 FRP 管-混凝土-钢管组合梁抗撞性能的理论分析模型[J]. 振动与冲击, 2017, 36(6): 246-252.
- ZOU Miao, WANG Rui. Theoretical model for the anti collision performance analysis of FRP tube concrete composite beams under lateral impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(6): 246-252.
- [24] 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.

(上接第 99 页)

- [18] ZHAO Xiaomin, PATEL T H, ZUO M J. Multivariate EMD and full spectrum based condition monitoring for rotating machinery [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012 27: 712-728.
- [19] 黄传金, 孟雅俊, 雷文平, 等. 复局部均值分解全矢包络技术及其在转子故障特征提取中的应用[J]. 机械工程学报 2016 52(7): 69-78.
- HUANG Chuanjin, MENG Yajun, LEI Wenping, et al. Full vector envelope technique based on complex local mean decomposition and its application in fault feature extraction for rotor system [J]. Journal of Mechanical of Engineering 2016, 52(7): 69-78.
- [20] 刘栋材, 郭杰, 申远. 基于 MEMD 与全息谱技术的加速度传感器信息融合[J]. 中国科学技术大学学报, 2016, 46(8): 69-78.
- LIU Dongcai, GUO Jie, SHEN Yuan. Information fusion of accelerometers based on the MEMD and holo-spectrum technology [J]. Journal of University of Science and Technology of China 2016 46(8): 69-78.
- [21] 张维光, 韩军, 周翔. 线结构光多分辨率测量系统数据拼接方法[J]. 仪器仪表学报 2013 34(7): 1441-1447.
- ZHANG Weiguang, HAN Jun, ZHOU Xiang. Data registration method for multiresolution measurement system with line structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013 34(7): 1441-1447.
- [22] RILLING G, FLANDRIN P, GONCALVES P, et al. Bivariate empirical mode decomposition [J]. IEEE Signal Process, 2007, 14(12): 936-939.