

## 侧向冲击作用下钢管混凝土构件的简化分析模型

瞿海雁<sup>1,2</sup>, 李国强<sup>1,3</sup>, 孙建运<sup>4</sup>, 陈素文<sup>1,3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 普渡大学 工程学院, 美国 西拉法叶 IN47907;  
3. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 4. 中国建筑股份有限公司 技术中心, 北京 100051)

**摘要:** 对两端固定的钢管混凝土构件在冲击作用下的动力响应进行数值模拟, 通过分析构件支座与跨中“塑性铰”形成机制及特征, 提出了圆钢管混凝土构件在侧向冲击作用下的简化分析模型. 一系列工况的比较与验证表明, 简化分析模型估算结果与数值模拟结果误差较小, 该模型在估算跨中、支座动态截面极限弯矩以及跨中截面最大挠度方面, 可以得到比较满意的计算结果, 可为工程提供参考.

**关键词:** 钢管混凝土; 塑性铰; 冲击作用; 数值模拟

**中图分类号:** TU 375

**文献标识码:** A

### Simplified Analysis model of Circular Concrete-filled Steel Tube Specimen Under Lateral Impact

QU Haiyan<sup>1,2</sup>, LI Guoqiang<sup>1,3</sup>, SUN Jianyun<sup>4</sup>, CHEN Suwen<sup>1,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Engineering, Purdue University, West Lafayette, USA, IN47907; 3. State Key Laboratory of Disaster Prevention in Civil Engineering, Shanghai 200092, China; 4. Technical Center, China State Construction Engineering Corporation, Beijing 100051, China)

**Abstract:** The dynamic response of fixed-end concrete-filled steel tube specimens under lateral impact is numerically simulated. The developing mechanics and characteristics of “plastic hinges” at the location of the mid-span and support section of these specimens are then analyzed. At last, a simplified analytic model is put forward to predict the maximum deflection of circular concrete-filled steel tube specimen under lateral impact. The comparisons and validations of a set of cases show that the results from the simplified analytic model agree well to the results from the numerical model. The simplified analytic model can give an ideal prediction on the dynamic ultimate moments of the support and mid-span sections and the maximum deflection of

the mid-span. It can also be referenced by engineering.

**Key words:** concrete-filled steel tube; plastic hinge; impact; numerical simulation

钢管混凝土构件可以充分发挥钢管和混凝土两种材料的优势, 具有优越的抗冲击性能. 此外, 钢管混凝土整体还具有承载力高、经济效益优良和施工方便等优点, 因而被广泛运用于高层建筑、工业厂房和拱桥结构等工程实践中<sup>[1]</sup>.

钢管混凝土结构在使用期内除了要承受常规荷载的作用, 还可能会遭遇到意外冲击, 如: 钢管混凝土桥墩有可能遭遇到来往船只的撞击, 多高层结构中的钢管混凝土柱也有可能遭到卡车或者飞机的撞击等. 近年来关于钢管混凝土结构的抗冲击性能研究也越来越多. 韩林海与 Hanbin Ge 等人<sup>[2-3]</sup>通过试验对钢管混凝土柱的强度和延性进行了研究, 表明钢管混凝土构件具有很好的抗冲击特性. Prichard、陈肇元和张望喜等人<sup>[4-6]</sup>分析了钢管混凝土构件抗轴向冲击性能, 表明钢管混凝土构件的延性和稳定性随着外围钢管的约束效果加强而加强. 王蕊、李珠等人<sup>[7-9]</sup>做了一系列试验研究了钢管混凝土构件的抗侧向冲击性能, 发现钢管混凝土构件在冲击下具有很好的塑性变形能力. 研究人员在钢管混凝土构件抗冲击性能方面已经取得了一定的成就, 但仍鲜有文献通过简化模型来分析钢管混凝土构件的抗侧向冲击性能. 基于此, 本文在前人试验的基础上讨论了钢管混凝土构件在侧向冲击作用下支座与跨中“塑性铰”的形成机制及特征; 并提出了圆钢管混凝土构件在侧向冲击作用下的简化分析模型, 以供实际工程参考.

收稿日期: 2009-10-14

第一作者: 瞿海雁(1977—), 男, 工学博士, 主要研究方向为结构抗爆、抗冲击. E-mail: haiyanqu2008@yahoo.com.cn

通讯作者: 李国强(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为多、高层钢结构, 结构抗火、抗爆. E-mail: guoqiangli@tongji.edu.cn

## 1 数值模拟描述

### 1.1 工况介绍

本文“塑性铰”简化分析模型的依据为文献[10]所做的圆钢管混凝土构件落锤试验. 分析模型中, 钢管直径为  $D$ , 厚度为  $t$ , 构件净长为  $L$ , 每端约束长度为 300 mm; 落锤由 45 号锻钢制成, 质量可在 1.9~240.0 kg 范围内调整; 底部安装冲击面为 30 mm × 80 mm, 硬度为 64HRC 的铬 15 楔形冲击头, 冲击体模拟尺寸为 30 mm × 80 mm × 80 mm, 通过调整冲击体材料密度来有效模拟冲击体质量; 冲击体下落高度(距离钢管混凝土高度)为  $H$ ; 落锤冲击部位位于构件跨中. 图 1 为试件在冲击后的变形, 由图 1 可以

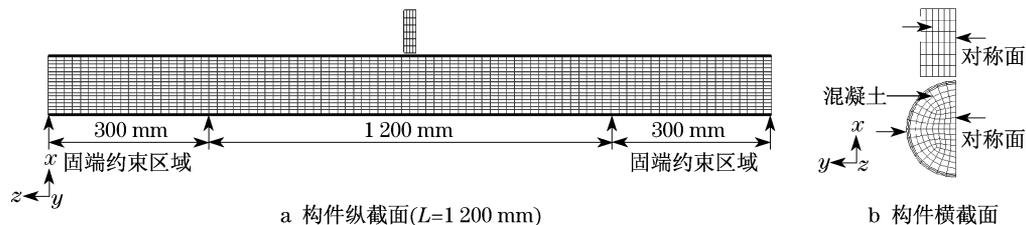


图 2 两端固支构件有限元模型  
Fig.2 Finite element model of the fixed-end specimen

冲击体、钢管、混凝土均采用具有较高精度和较好收敛性的六面体 solid164 实体单元进行模拟, 在网格化过程中, 网格大小不超过 20 mm, 本文通过约束钢管两端约束区域的外围节点  $x, y, z$  方向位移来模拟构件两端固支; 忽略钢管与混凝土之间的滑移; 钢管与混凝土采用完全黏结方式; 同时在构件和冲击体对称面上采取对称约束. 文中采用 CONCRETE\_DAMAGE\_REL3 (MAT\_72\_REL3) 模拟混凝土材料, 其应变率效应通过设置与文献[12]相同的动力增大系数 (DIF) 曲线来考虑. 钢材采用 PLASTIC\_KINEMATIC (MAT\_003) 材料模型, 此材料模型可以用来模拟钢梁、钢柱等钢结构构件在高速加载情况下的响应. 冲击体与钢管混凝土构件之间的接触采用面面接触类型来模拟. 表 1 列出了文献[10]试验中实测的材性参数.

## 2 截面动、静态极限弯矩

### 2.1 截面动态极限弯矩

选取特定圆钢管混凝土构件遭受特定冲击时的工况作为基准参考工况. 其中构件截面:  $D \times L \times t$  为 114.0 mm × 1 200.0 mm × 3.5 mm, 两端固支, 钢

看出在跨中和支座附近形成了明显的塑性铰.

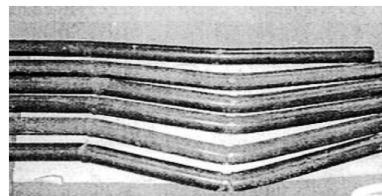


图 1 试件冲击后变形<sup>[10]</sup>  
Fig.1 Deformation shape of the specimen after impact<sup>[10]</sup>

### 1.2 有限元模拟

本文数值分析采用的软件是 LS-DYNA 程序<sup>[11]</sup>. 在模拟过程中, 为了简化计算, 取构件 1/2 对称结构进行分析. 有限元模型见图 2.

表 1 冲击实验材料参数

Tab.1 Material parameter of the drop tests

| 材料  | 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量/<br>GPa                           | 强化模量/<br>GPa | 屈服强度/<br>MPa | 泊松比 |
|-----|--------------------------------------------|----------------------------------------|--------------|--------------|-----|
| 钢材  | $7.850 \times 10^3$                        | 206                                    | 3.09         | 241          | 0.3 |
| 冲击体 | 采用等效密度,<br>可调                              | 206                                    | 3.09         | 241          | 0.3 |
| 混凝土 | $2.500 \times 10^3$                        | 立方体抗压强度为 47.5 MPa,<br>轴心抗压强度为 32.4 MPa |              |              |     |

材及混凝土材性参数同表 1; 冲击体质量为 202.8 kg, 冲击高度为 4.5 m, 即冲击动量  $P$  为 1 904.29 N · s, 冲击动能  $E_1$  为 8 940.65 J. 图 3—5 绘出了参考工况中构件跨中、1/4 跨中、近支座处 ( $z = 1 180.0$  mm, 由于支座处受到固定约束, 位移很小, 因而选取靠近支座处截面) 各截面弯矩与相应截面中心节点位移关系曲线. 从图 3, 4 可以看出, 在跨中和支座附近, 截面达到某一弯矩值后基本不变, 而位移增大, 这意味着“塑性铰”的形成, 本文将这一基本不变的弯矩定义为相应截面动态极限弯矩. 从图 5 可以看出, 随着位移的增加, 1/4 跨中截面弯矩变化相当明显, 可见并没有达到相应的动态极限弯矩.

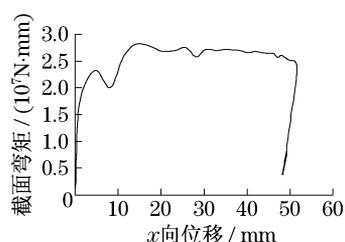


图3 跨中( $z=600.0$  mm)截面弯矩与截面中心节点  $x$  向位移关系曲线

Fig.3 Mid-span section( $z=600.0$  mm)moment versus section center  $x$ -displacement curve

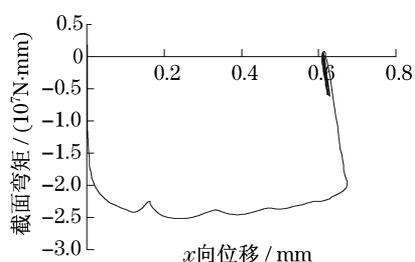


图4 支座附近( $z=1180.0$  mm)截面弯矩与截面中心节点  $x$  向位移关系曲线

Fig.4 Near support section( $z=1180.0$  mm)moment versus section center  $x$ -displacement curve

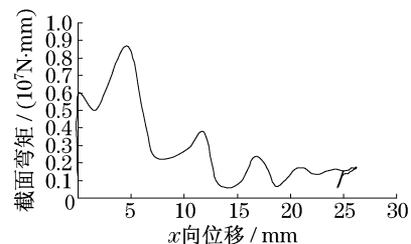


图5 1/4跨中( $z=900.0$  mm)截面弯矩与截面中心节点  $x$  向位移关系曲线

Fig.5 One-fourth span section( $z=900.0$  mm)moment versus section center  $x$ -displacement curve

## 2.2 截面静态极限弯矩

利用文献[13]提供的圆钢管混凝土在静荷载作用下抗弯承载力的计算方法,可以求得截面静态塑性弯矩.具体计算公式如下:

$$M_u = r_m W_{scm} f_{scy} \quad (1)$$

式中: $M_u$ 为钢管混凝土的抗弯强度承载力; $r_m$ 为抗弯强度承载力计算系数; $W_{scm}$ 为构件截面抗弯模

量; $f_{scy}$ 为钢管混凝土构件轴心受压时的强度指标.

$r_m$ 的表达式为

$$r_m = 1.1 + 0.48 \ln(\xi + 0.1) \quad (2)$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (3)$$

式中: $\xi$ 为约束效应系数; $A_s$ 为外围钢管的面积; $A_c$ 为核心混凝土面积; $f_y$ 为钢材的屈服强度; $f_{ck}$ 为混凝土的轴心抗压强度标准值.

组合截面抗弯模量  $W_{scm}$ 的表达式为

$$W_{scm} = \pi D^3 / 32 \quad (4)$$

$f_{scy}$ 的表达式为

$$f_{scy} = (1.212 + B\xi + C\xi^2) f_{ck} \quad (5)$$

对于圆钢管混凝土,系数  $B, C$ 的表达式为

$$B = 0.1759 \times \left(\frac{f_y}{235}\right)^a + 0.974 \quad (6)$$

$$C = -0.1038 \times \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^b + 0.0309 \quad (7)$$

系数  $a$ 的表达式为

当  $f_y \leq 450$  MPa 时,

$$a = 1 \quad (8)$$

当  $f_y > 450$  MPa 时,

$$a = \frac{450}{f_y} \quad (9)$$

系数  $b$ 的表达式为

当  $f_y > 450$  MPa 时,

$$b = \left(\frac{f_{ck}}{41}\right)^{0.1} \left(\frac{450}{f_y}\right)^{1.1} \quad (10)$$

当  $f_y \leq 450$  MPa 时,若  $f_{ck} \leq 41$  MPa,则

$$b = 1 \quad (11)$$

若  $f_{ck} > 41$  MPa,则

$$b = \left(\frac{f_{ck}}{41}\right)^{0.1} \left(\frac{450}{f_y}\right)^{0.4} \quad (12)$$

## 2.3 截面动、静态极限弯矩比较

对于一般工况而言,利用公式(1)~(12)可计算出钢管混凝土构件跨中截面静态极限弯矩  $M_u$ ,利用数值模拟方法可得到跨中截面动态极限弯矩  $M_d$ ,通过比较可得到跨中截面动、静态极限弯矩基本比值,以下简称  $\beta$  ( $\beta = M_d / M_u$ ).表2列出基准参考工况时跨中截面动、静态极限弯矩基本比值.

表2 跨中截面参数

Tab.2 Parameters of the mid-span section

| $D/mm$ | $T/mm$ | $f_y/$<br>( $N \cdot mm^{-2}$ ) | $f_{ck}/$<br>( $N \cdot mm^{-2}$ ) | $M_u/$<br>( $10^7 N \cdot mm^{-1}$ ) | $M_d/$<br>( $10^7 N \cdot mm^{-1}$ ) | $M_0/$<br>( $10^7 N \cdot mm^{-1}$ ) | $M_d/M_0$ | $M_d/M_u$ |
|--------|--------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------|
| 114    | 3.5    | 241                             | 32.40                              | 1.21                                 | 2.82                                 | 2.52                                 | 1.12      | 2.33      |

注: $M_0$ 为支座截面动态极限弯矩.

## 2.4 影响参数分析

以参考工况为基础,分别改变混凝土强度、钢材强度、构件长度、冲击能量、冲击动量等参数后进行数值模拟,并讨论这些参数对构件动、静态截面极限弯矩比值  $\beta$  的影响。

### 2.4.1 混凝土强度的影响

参考工况中仅改变混凝土强度,其他条件不变,并对其数值模拟.表 3 列出了混凝土等级分别为 C40, C50, C60 时的  $\beta$  值.从表 3 可知,当冲击高度为 4.5 m,混凝土等级为 C50 时,  $\beta$  为 2.33;当混凝土为 C40 和 C60 时,  $\beta$  分别为 2.34, 2.30. 相对于不同的混凝土等级而言,  $\beta$  值差别不超过 1%. 因此对于工程而言,可忽略混凝土等级改变而导致的  $\beta$  值的改变。

表 3 混凝土等级对  $\beta$  值的影响

| 混凝土等级 | $M_u/$<br>( $10^7\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) | $M_d/$<br>( $10^7\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) | $\beta$ | 比值<br>改变率/% |
|-------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|-------------|
| C40   | 1.18                                            | 2.76                                            | 2.34    | 101         |
| C50   | 1.21                                            | 2.82                                            | 2.33    | 100         |
| C60   | 1.24                                            | 2.86                                            | 2.30    | 99          |

### 2.4.2 钢材强度的影响

参考工况中仅改变钢材级别,其他条件不变,对其进行数值模拟.表 4 列出了 Q235, Q345 不同工况下的  $\beta$  值.从表 4 可知,当冲击高度为 4.5 m,钢材级别为 Q235 时,  $\beta$  为 2.33;当钢材为 Q345 时,  $\beta$  为 2.28. 两种工况下的  $\beta$  值差别不超过 2%. 对于工程而言,可忽略钢材级别由 Q235 改变为 Q345 时导致的  $\beta$  值的改变。

表 4 钢材级别对  $\beta$  值的影响

| 钢材级别 | $M_u/$<br>( $10^7\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) | $M_d/$<br>( $10^7\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) | $\beta$ | 比值<br>改变率/% |
|------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|-------------|
| Q235 | 1.21                                            | 2.82                                            | 2.33    | 100         |
| Q345 | 1.66                                            | 3.79                                            | 2.28    | 98          |

### 2.4.3 构件长度的影响

为了研究构件长度对动态、静态截面极限弯矩比值的影响,本文引入等效长细比  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{L}{D} \quad (13)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{32M_u}{f_y \pi}} \quad (14)$$

表 5 列出了构件长度对  $\beta$  值的影响。

表 5 构件长度对  $\beta$  值的影响

Tab.5 Analysis of the specimen length

| $L/m$ | $M_u/$<br>( $10^7\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) | $\lambda$ | $M_d/$<br>( $10^7\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) | $\beta$ | $C_1$ |
|-------|-------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------|---------|-------|
| 1.2   | 1.21                                            | 14.87     | 2.82                                            | 2.33    | 1.00  |
| 1.6   | 1.21                                            | 19.83     | 2.65                                            | 2.19    | 0.94  |
| 2.0   | 1.21                                            | 24.79     | 2.60                                            | 2.14    | 0.92  |
| 2.4   | 1.21                                            | 29.75     | 2.53                                            | 2.09    | 0.90  |

式(15)是通过数据拟合方法得到的修正系数  $C_1$  与等效长细比  $\lambda$  的函数关系。

$$C_1 = 1.274 - 0.025\lambda + 4.065 \cdot 10^{-4}\lambda^2 \quad (15)$$

图 6 为  $C_1$  与  $\lambda$  的关系曲线。

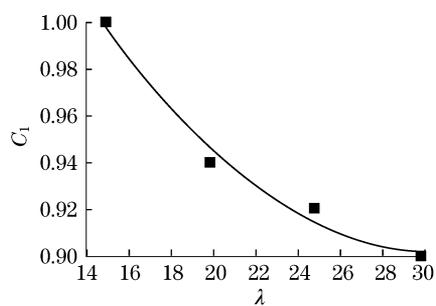


图 6  $C_1$  与  $\lambda$  关系曲线

Fig.6 Relationship of  $C_1$  and  $\lambda$

### 2.4.4 冲击能量的影响

为了研究冲击能量对动、静态截面极限弯矩比值的影响,本文引入等效转角  $\delta$ .

$$\delta = \frac{E_1}{4M_u} \quad (16)$$

式中:  $E_1$  为初始冲击能量.表 6 列出了相同动量 ( $P_1 = 1\ 904.29\ \text{J}$ ) 下不同冲击能量  $E_1$  对构件  $\beta$  值的影响。

表 6 冲击能量对  $\beta$  值的影响

Tab.6 Analysis of the impact energy

| $E_1/\text{J}$ | $M_u/$<br>( $10^7\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) | $\lambda$ | $M_d/$<br>( $10^7\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) | $\beta$ | $C_2$ |
|----------------|-------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------|---------|-------|
| 4 760.73       | 1.21                                            | 0.10      | 2.60                                            | 2.15    | 0.92  |
| 8 940.65       | 1.21                                            | 0.18      | 2.82                                            | 2.33    | 1.00  |
| 4 760.73       | 1.21                                            | 0.29      | 3.07                                            | 2.53    | 1.09  |

式(17)是通过数据拟合方法得到的修正系数  $C_2$  与等效转角  $\delta$  的函数关系。

$$C_2 = 0.803 + 1.268\delta - 0.957\delta^2 \quad (17)$$

图 7 为  $C_2$  与  $\delta$  的关系曲线。

### 2.4.5 冲击动量的影响

为了研究冲击动量对  $\beta$  值的影响,本文引入等效平均速度  $v$ .

$$v = \frac{P_1}{m} \quad (18)$$

式中:  $m$  为构件总质量.

表7列出了冲击能量相同( $E_1 = 8\,940.65\text{ J}$ ),不同冲击动量情况下动、静态截面极限弯矩比值.

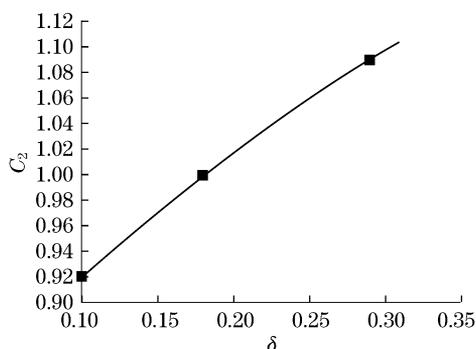


图7  $C_2$  与  $\delta$  关系曲线

Fig.7 Relationship of  $C_2$  and  $\delta$

表7 冲击动量对  $\beta$  值的影响

Tab.7 Analysis of the impact momentum

| $P_1/$<br>( $\text{N} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $M_u/$<br>( $10^7 \text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) | $v/$<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $M_d/$<br>( $10^7 \text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) | $\beta$ | $C_3$ |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------|-------|
| 3 576.26                                     | 1.21                                               | 93.1                                       | 2.66                                               | 2.20    | 0.94  |
| 1 904.29                                     | 1.21                                               | 49.6                                       | 2.82                                               | 2.33    | 1.00  |
| 1 192.09                                     | 1.21                                               | 31.0                                       | 2.94                                               | 2.43    | 1.04  |

式(19)是通过数据拟合方法得到的修正系数  $C_3$  与等效速度  $v$  的函数关系

$$C_3 = 1.126 - 0.003v + 1.242 \times 10^{-5}v^2 \quad (19)$$

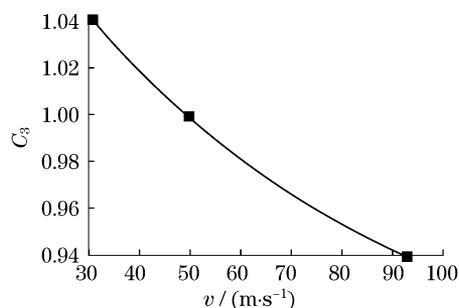


图8  $C_3$  与  $v$  关系曲线

Fig.8 Relationship of  $C_3$  and  $v$

### 3 简化分析模型

#### 3.1 模型基本原理

根据能量守恒可知,在最大挠度时刻,冲击体动能主要转化为构件变形能,较少部分转化为冲击体变形能,因此本文忽略此部分变形能.由于构件变形能主要集中在“塑性铰”区域,非“塑性铰”区域很少,

因此可假设在最大挠度时刻,冲击体动能全部转化为构件变形能,并消耗在“塑性铰”区域.对此,本文提出“等效塑性铰”方法(图9)来计算构件最大挠度时刻变形能.即在跨中与支座分别采用“等效塑性铰”,然后利用截面动态塑性弯矩乘以构件转角来计算构件变形能.

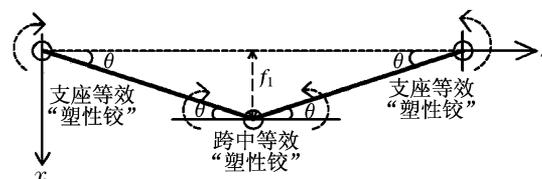


图9 “等效塑性铰”简化分析模型

Fig.9 “Equivalent plastic hinge” analysis model

简化分析模型求解公式如下:

$$\theta = \frac{E_1}{2M_2 + 2M_1} \quad (20a)$$

$$E_{\text{Mid}} = 2M_2 \theta \quad (20b)$$

$$E_{\text{End}} = 2|M_1| \theta \quad (20c)$$

$$f_1 = \theta(L/2) \quad (21)$$

式中:  $\theta$  为构件转角;  $E_1$  为接触前冲击体动能;  $M_2$  为构件跨中截面动态极限弯矩;  $M_1$  为构件支座处动态截面极限弯矩;  $f_1$  为构件跨中最大挠度.

#### 3.2 模型运用步骤

(1) 在简化分析模型中,先利用修正系数法,求出在特定冲击荷载作用下构件跨中与支座截面动态极限弯矩  $M_2, M_1$ . 其计算过程如下:

对于一般工况,首先利用式(1)~(12)可计算出钢管混凝土构件跨中、支座截面静态极限弯矩,然后将截面静态极限弯矩、基本比值、特定冲击下的各修正系数(构件长度修正系数、冲击动量修正系数等)相乘,可得到特定冲击作用下的构件跨中、支座截面动态极限弯矩(参考式(22)).

(2) 根据已知接触前冲击体动能,利用式(20a)来计算构件转角  $\theta$ .

(3) 利用等式(21),求得构件跨中最大挠度.

#### 3.3 简化分析模型验证

特定冲击下的跨中截面动态极限弯矩可以通过修正系数法求得.

$$M_d = 2.33C_1 C_2 C_3 M_u \quad (22)$$

表2所示的基本参考工况中,跨中、支座截面动态极限弯矩比值为1.12,由于在不同的工况中,跨中、支座截面动态极限弯矩比值变化较小,因此忽略这种变化,即保持跨中动态极限弯矩跟支座极限弯

矩的比值 1.12 不变,则式(20a)—(20c)可简化为式(23).

$$\theta = E_1 \left/ \left( \frac{2}{1.12} M_d + 2M_d \right) \right. = E_1 / 3.79 M_d \quad (23)$$

首先通过式(22)求得跨中截面动态极限弯矩,然后通过式(23)求得构件最大挠度时刻的转角,最后利用式(21)得到构件跨中最大挠度.表8为简化分析模型验证工况表,表9为模型验证工况表,由表

8,9可知,对于跨中动态极限弯矩值而言,数值模拟结果与简化公式计算结果误差小于4%,对于跨中截面最大挠度而言,两者误差也不超过6%,表明采用简化分析模型不仅可以估算出跨中、支座动态截面极限弯矩,而且还可以估算出跨中截面最大挠度.由于简化分析模型避免了繁琐的数值模拟计算,从而使操作相对简单、快速,便于工程参考和运用.

表8 简化分析模型验证工况表

Tab.8 Cases for verifying the simplified analytic model

| 工况 | $D \times L \times t / (\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm})$ | 约束形式 | 材料特征            | $P_1 / (\text{N} \cdot \text{s}^{-1})$ | $E_1 / \text{J}$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ |
|----|-----------------------------------------------------------------------|------|-----------------|----------------------------------------|------------------|-------|-------|-------|
| A1 | 114 × 1 600 × 3.8                                                     | 固-固  | 混凝土 C50 钢材 Q235 | 1 904.29                               | 8 940.65         | 0.942 | 0.993 | 1.033 |
| A2 | 120 × 1 600 × 4.0                                                     | 固-固  | 混凝土 C60 钢材 Q345 | 2 189.29                               | 11 817.00        | 0.972 | 0.961 | 1.030 |
| A3 | 100 × 1 200 × 3.5                                                     | 固-固  | 混凝土 C40 钢材 Q235 | 1 555.48                               | 5 965.25         | 0.973 | 0.988 | 1.005 |

表9 模型验证工况表

Tab.9 Cases for verifying the simplified computational model

| 工况 | 动态截面极限弯矩 / ( $10^7 \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ) |      | 动态截面极限弯矩<br>误差 / % | 跨中最大挠度 / mm |       | 最大挠度误差 / % |
|----|----------------------------------------------------|------|--------------------|-------------|-------|------------|
|    | 数值模拟                                               | 简化模型 |                    | 数值模拟        | 简化模型  |            |
| A1 | 2.82                                               | 2.93 | 4                  | 66.84       | 64.50 | 4          |
| A2 | 4.58                                               | 4.74 | -4                 | 56.01       | 52.62 | 6          |
| A3 | 2.02                                               | 2.01 | 1                  | 46.56       | 46.95 | 1          |

## 4 其他支承情况的讨论

对于一端固支、一端简支的圆钢管混凝土构件,其简化分析方法和两端固支构件的简化方法基本类似.由于端部约束不同使得这类构件只能形成两个塑性铰,在推导简化公式时,需对式(20)—(23)进行相应的调整

$$\theta = \frac{E_1}{2M_2 + M_1} \quad (24a)$$

$$E_{\text{Mid}} = 2M_2 \theta \quad (24b)$$

$$E_{\text{End}} = |M_1| \theta \quad (24c)$$

$$f_1 = \theta L / 2 \quad (25)$$

$$M_d = C_{10} C_{20} C_{30} \beta_1 M_u \quad (26)$$

$$\theta = E_1 \left/ \left( \frac{1}{1.12} M_d + 2M_d \right) \right. = E_1 / 2.89 M_d \quad (27)$$

式中: $C_{10}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{30}$ 分别表示一端固支、一端简支圆钢管混凝土构件在侧向冲击下的等效长细比修正系数、等效转角修正系数、等效速度修正系数; $\beta_1$ 表示参考工况时对应构件跨中截面动、静态极限弯矩比值.

## 5 结论

虽然数值模拟方法可以精确模拟钢管混凝土构件在侧向冲击下的动力响应,但计算起来非常复杂,对使用者的理论水平要求较高,不利于工程应用.因此本文以理论分析和数值模拟相结合的方法,建立了钢管混凝土构件在侧向冲击作用下的简化分析模型,并得到了以下结论:

对于侧向冲击作用下的圆钢管混凝土构件:

(1) 其他参数不变时,可忽略混凝土等级由 C50 变为 C40, C60 时导致的截面动态极限弯矩的变化.

(2) 其他参数不变时,可忽略钢材等级由 Q235 改变为 Q345 时导致的截面动态极限弯矩的变化.

(3) 构件长度对动态截面极限弯矩的影响比较明显,可采用式(15)进行计算和分析.

(4) 冲击体的冲击动能、冲击动量对构件动态截面极限弯矩的影响较大,不能忽略.可通过式(17)计算冲击动能对动态截面极限弯矩的影响,式(19)计算冲击动量导致的影响.

(5) 在最大挠度时刻,冲击体动能主要转化为

构件变形成,且主要集中在构件“塑性铰”区域,非“塑性铰”区域很少.针对这一特点,利用能量守恒原理,提出了“等效塑性铰”方法,用以估算构件跨中最大挠度.

经过对比验证可知,本文建立的简化分析模型计算结果与数值模拟结果比较接近,说明本文提出的“等效塑性铰”简化分析模型在估算跨中、支座动态截面极限弯矩以及跨中截面最大挠度方面,可以得到比较满意的计算结果.

### 参考文献:

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 哈尔滨:黑龙江出版社,1987.  
ZHONG Shantong. Concrete-filled steel tube structure [M]. Helongjiang, Helongjiang Press, 1987.
- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2004.  
HAN Linhai. The structure of steel tube filled concrete—theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [3] GE Hanbin. Strength of concrete-filled thin-walled steel box column: experiment [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1992, 118(11): 3036.
- [4] Prichard S J, Perry S H. Impact behaviour of sleeved concrete cylinders [J]. Structural Engineering, 2000, 78A(17): 23.
- [5] 陈肇元. 钢筋混凝土结构构件在冲击荷载下的性能 [M]. 北京:清华大学出版社,1986.  
CHEN Zhaoyuan. The performance of concrete filled steel tube under impact load [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986.
- [6] 张望喜,单建华. 冲击荷载下钢管混凝土柱模型力学性能试验 [J]. 振动与冲击, 2006, 25(5): 96.  
ZHANG Wangxi, SHAN Jianhua. Experimental research on mechanical behavior of concrete filled steel tubes model under impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(5): 96.
- [7] 王蕊,李珠,任够平,等. 钢管混凝土梁在侧向冲击荷载作用下动力响应的试验研究和数值模拟[J]. 土木工程学报, 2007, 40(10): 34.  
WANG Rui, LI Zhu, REN Guoping, et al. Experimental study and numerical simulation of the dynamic response of concrete filled steel tubes under lateral impact load [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(10): 34.
- [8] 李永刚,李珠,张善元. 钢管混凝土耐撞性能分析[J]. 太原理工大学学报, 2007, 38(5): 94.  
LI Yonggang, LI Zhu, ZHANG Shanyuan. Analysis of concrete filled steel tube impact resisting capability [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2007, 38(5): 94.
- [9] 李珠,王瑞峰. 固简支钢管混凝土构件侧向冲击试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(增1): 193.  
LI Zhu, WANG Ruifeng. Experimental study of fixed-freely supported concrete filled steel tubular under lateral impact load [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(Sup 1): 193.
- [10] 李文亮. 侧向冲击钢管混凝土构件的试验研究和仿真数值分析[D]. 太原:太原理工大学水利科学与工程学院, 2007.  
LI Wenliang. Experimental study and numerical simulation analysis of the concrete filled in steel tube specimens under lateral impact[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology. College of Water Conservancy Science and Engineering, 2007.
- [11] LS-DYNA. Keyword user's manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [12] 瞿海雁,李国强,孙建运,等. 侧向冲击作用下圆钢管混凝土构件的数值模拟分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 89.  
QU Haiyan, LI Guoqiang, SUN Jianyun, et al. Numerical simulation analysis of circular concrete filled steel tube specimen under lateral impact[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 89.
- [13] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2000.  
HAN Linhai. Concrete-filled steel tubular structure [M]. Beijing: Science Press, 2000.