

9-2-2020

## Non-uniform Axial Force Precise Modeling and Simulation of Recycled Aggregate Concrete Confined by Steel Tube Column

Wenxian Feng

1. *School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;;*

Yunchao Tang

1. *School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;;*

Zhang Ye

2. *School of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;*

Cai Yang

1. *School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Non-uniform Axial Force Precise Modeling and Simulation of Recycled Aggregate Concrete Confined by Steel Tube Column

## Abstract

**Abstract:** According to the complexity of non-uniform axial force on recycled aggregate concrete confined by steel tube column, *precise modeling and simulation on non-uniform axial force were put forward, mechanic properties of axial force under uniform and non-uniform conditions were analyzed, and its three-dimensional model and force model were established. Then impact of load capacity was analyzed, such as geometric diameter, loading condition, and deformation during production.* Force simulation and experimental results fit relatively well. It turned out that uniform axial load capacity was greater than concentrated eccentric axial load capacity. Besides, eccentric axial load capacity was related to eccentricity. Moreover, it could be singled out that non-uniform axial load capacity was greater than concentrated eccentric axial load capacity. The research demonstrates that variation in parameter selection, different force conditions have relatively high influence on load capacity of components. The results verify the validity of calculation approach and model.

## Keywords

recycled aggregate concrete, non-uniform, axial force, precise modeling, simulation

## Authors

Wenxian Feng, Yunchao Tang, Zhang Ye, Cai Yang, Dingjing Bao, and Jinmu Hu

## Recommended Citation

Feng Wenxian, Tang Yunchao, Zhang Ye, Cai Yang, Bao Dingjing, Hu Jinmu. Non-uniform Axial Force Precise Modeling and Simulation of Recycled Aggregate Concrete Confined by Steel Tube Column[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 410-417.

# 钢管约束再生混凝土柱的非均匀轴向受力建模与仿真

冯文贤<sup>1</sup>, 唐昀超<sup>1</sup>, 张焯<sup>2</sup>, 蔡杨<sup>1</sup>, 宝鼎晶<sup>1</sup>, 胡金木<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广州 510006; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:** 针对钢管再生混凝土柱组件的非均匀轴向受力的复杂性, 提出了非均匀轴向受力的精确建模与仿真, 分析了轴向受力的均匀和非均匀条件下的力学性能, 构建了组件的三维和压力模型。分析了几何参数、受力和变形等因素对承载力的影响。仿真与试验结果较吻合, 均匀轴压承载力大于非均匀承载力, 偏心轴压的承载力与偏心距相关, 非均匀轴压的承载力高于偏心轴向承载能力。研究表明, 参数选择和受力情况对承载力影响较大, 结果验证了计算方法和模型的有效性。

**关键词:** 再生混凝土; 非均匀; 轴向压力; 精确建模; 仿真

中图分类号: TU775

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 02-0410-08

## Non-uniform Axial Force Precise Modeling and Simulation of Recycled Aggregate Concrete Confined by Steel Tube Column

Feng Wenxian<sup>1</sup>, Tang Yunchao<sup>1</sup>, Zhang Ye<sup>2</sup>, Cai Yang<sup>1</sup>, Bao Dingjing<sup>1</sup>, Hu Jinmu<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;  
2. School of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** According to the complexity of non-uniform axial force on recycled aggregate concrete confined by steel tube column, *precise modeling and simulation on non-uniform axial force were put forward, mechanic properties of axial force under uniform and non-uniform conditions were analyzed, and its three-dimensional model and force model were established. Then impact of load capacity was analyzed, such as geometric diameter, loading condition, and deformation during production.* Force simulation and experimental results fit relatively well. It turned out that uniform axial load capacity was greater than concentrated eccentric axial load capacity. Besides, eccentric axial load capacity was related to eccentricity. Moreover, it could be singled out that non-uniform axial load capacity was greater than concentrated eccentric axial load capacity. The research demonstrates that variation in parameter selection, different force conditions have relatively high influence on load capacity of components. The results verify the validity of calculation approach and model.

**Keywords:** recycled aggregate concrete; non-uniform; axial force; precise modeling; simulation

## 引言

新型装配式钢结构体系、钢管约束的再生混凝土柱(简称: 钢管再生混凝土柱)组件及其复杂受力系统的研究成为绿色低碳制造可持续发展的最重

要课题, 钢管再生混凝土柱的工业化制造及其虚拟制造是绿色节能制造的必然发展之路, 建模与仿真已成为解决非线性复杂问题的重要手段<sup>[1-7]</sup>。与实际制造结合, 肖田元<sup>[8]</sup>提出了虚拟制造系统的体系结构, 其中给出了虚拟加工平台的设计、工艺与装配 3 个模块, 一个数字化模型和数据管理(PDM)模块, 该体系成为指导虚拟制造、建模与仿真的重要理论。



作者简介: 冯文贤(1962-), 女, 湖南人常德人, 硕士, 教授, 研究方向为钢管再生混凝土、桥梁及其仿真; 唐昀超(1983-), 男, 湖南衡阳人, 硕士生, 研究方向为钢管再生混凝土、桥梁及其仿真。  
收稿日期: 2014-03-22 修回日期: 2014-05-18  
基金项目: 国家自然科学基金(51278129)

地震和城镇改造产生的大量废弃固体和建筑垃圾使废旧混凝土的再生利用成为目前研究热点。再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete, 简称 RAC)是将废弃混凝土块经破碎、清洗、分级和按一定的比例与等级配合、部分或全部代替天然骨料所制成的混凝土<sup>[9-10]</sup>, 将其填充于钢管中, 形成新型复合结构或称钢管组件系统, 将解决废弃建筑垃圾堆放问题, 创造效益, 减少污染。

近年国内外学者研究了钢管 RAC 柱和混凝土受力特性, 通过实验、计算和仿真研究了其组件受力<sup>[3,7]</sup>, 重点讨论了钢管 RAC 柱的轴向承载力及变形等<sup>[9-13]</sup>。文献[7]用试验与仿真方法对静态与动态的钢管再生和标准的混凝土柱进行了受力分析。文献[14-17]对 RAC、混凝土预埋钢管施工、拱坝浇筑、内爆条件下混凝土损伤力学特性进行了研究。文献[18]利用 ANSYS 软件的用户可编程特性 (UPFs), 作了二次开发, 建立了混凝土受力模型, 实现了早期混凝土徐变应力的有限元分析与仿真求解, 弥补了该软件不能进行早期徐变应力分析的不足之处。

钢管 RAC 柱组件(以下简称组件)的轴向受力在实际应用中通常是非线性和随机不确定的, 尤其是在振动和长期受压情况下, 整体结构发生变形使得均匀受力变成了非均匀受力<sup>[3]</sup>。例如, 地震对混凝土结构的影响使得建筑和桥梁中的柱受力而发生倾斜或微量变形。另外, 重载汽车通过桥梁, 桥墩瞬间受压是一种非线性和非均匀受压, 因长期不均匀的受力使得梁或柱发生变形而损伤。同时, 钢管在制造中产生了变形, 这种几何形状的缺陷对钢管 RAC 柱的极限承载力有一定程度的不利影响<sup>[3]</sup>。这些随机未知外力及其非均匀性对组件所产生的不利影响成为安全的重要隐患, 其受力分析是钢管 RAC 柱的可靠性和应用的重要内容。受到现有实验手段和设备的制约, 常用试验方法难以实现, 人们较少讨论该类受力情况。

目前钢管 RAC 柱组件的相关研究主要集中在均匀轴向压力、偏心轴向压力的受力分析与试验,

对其非均匀轴向压力建模和仿真研究较少<sup>[3]</sup>, 另外, 也较少从大批量工业制造及其虚拟制造的角度来考虑组件设计与制造工艺优化, 以减少传统的单件小批制作工艺与大量试验产生粉尘。基于上述问题, 本文提出了钢管 RAC 柱的非均匀轴向受力的精确建模与仿真。采用仿真的方法模拟实际受力, 分析了钢管 RAC 柱的均匀、非均匀条件下的轴向受力性能, 并构建了其三维模型和受力模型, 给出了均匀、非均匀的轴向力分布图。最后对圆钢管 RAC 柱受力进行了仿真, 为了验证建模与仿真的有效性, 分别与均匀和偏压试验进行对比, 为组件设计提供参考和依据。研究为虚拟加工平台子模块和企业虚拟制造提供支持。

## 1 组件试验与轴向受力分布模型

### 1.1 组件的轴压试验方法与三维建模

试验装置采用压力机(图 1a)测试钢管 RAC 柱的轴向压力, 竖向轴力由量程 5 000 kN 的千斤顶施加压力, 用传感器检测位移和应变<sup>[13]</sup>。本文主要讨论竖向轴压。

轴向受力性能试验方法常用有两种, 第 1 种是压力机轴向压轴与钢管 RAC 柱的端面成 90°垂直方向, 使钢管 RAC 柱端面垂直均匀受压。第 2 种是在压轴和钢管 RAC 柱的端面之间的某偏心处放置一根小钢轴, 压力压在小钢轴上, 使钢管 RAC 柱受偏压。

本文把组件的轴向受力分为均匀和非均匀轴压, 非均匀包括偏心和变力轴压。其中变力轴向力为变量, 面积也可为变量。当压力作用于柱端面的局部区域时, 受力面积变小, 存在偏心距  $e$  时, 则为偏压。变力轴压主要指同时作用于组件端面力的大小不等。为了与已有的试验作对比, 以下给出均匀、非均匀的偏心和变力受力分析及其建模:

第一种情况是轴向均匀加载, 组件承受均匀轴向压力<sup>[3,19]</sup>。材料的应力应变理论表达式为:

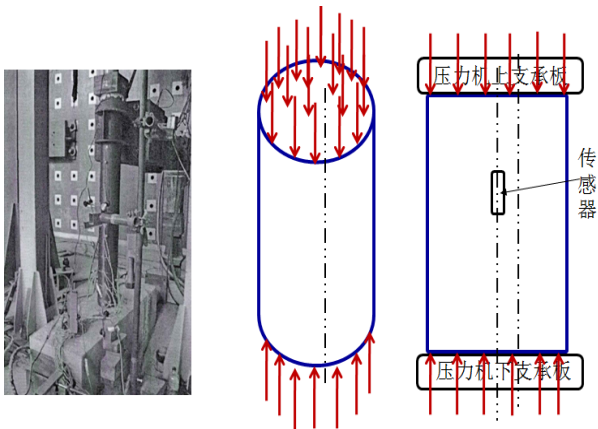
$$\sigma = N / A \quad (1)$$

$$\varepsilon = \Delta l / l \quad (2)$$

式中:  $N$  为试件的轴向荷载;  $A$  为钢管 RAC 的截面面积;  $\Delta l$  为试件的轴向压缩变形值;  $l$  为试件高度。

由式(1)可知, 应力与均匀轴向压力和钢管 RAC 柱端面的面积相关, 钢管 RAC 柱由多种材料构成的组件, 则与钢管面积、核心再生混凝土面积、钢管套箍系数、折减系数、再生粗骨料取代率相关。

图 1 分别给出了组件均匀受压时的压力机、轴压分布三维模型、轴压的压力平面受力分析图, 其特点: 受压面积不变, 为整个柱的端面, 轴向力均匀。



(a) 组件压力测试 (b) 均匀轴压三维模型 (c) 受均匀压力

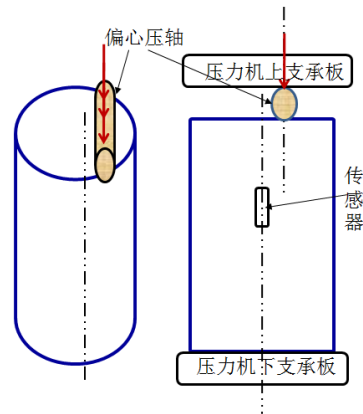
图 1 均匀轴压受力原理分析图

第 2 种给出了组件的轴向偏心加载, 加载前在组件上端面偏心处水平放置一根小直径的圆钢压轴, 压力集中作用在该压轴上。图 2 分别给出了三维立体的偏压受力模型和偏压轴向受力平面示意图。受压特点, 受压面积变小, 为了与试验对比, 这里也取压轴上的轴向力均匀, 组件端面受力不均匀, 压轴与钢管 RAC 柱中心有一偏心距  $e$ , 改变  $e$  的参数可分析偏心轴压情况。

目前压力机及其辅助工具可完成均匀和偏心轴向受力试验<sup>[3,9]</sup>。

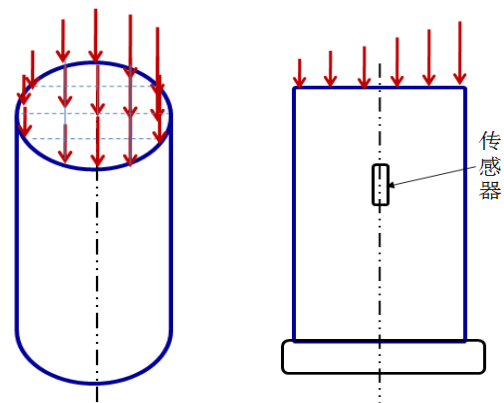
第 3 种给出了非均匀变力的轴压情况, 为简化仿真模型, 假设受压面积不变, 作用于同一面积上的力是变量。模拟实际组件端面受变力, 图 3 分别

给出了三维立体的非均匀受力模型和轴向受力平面示意图。受压特点, 受压面积不变, 为整个端面, 轴向受力不均匀, 图中压力以递增状态分布在端平面上。目前研究还没有得到该情况受力与第 1 种和第 2 种对比的试验结论。为了求解该难题, 用仿真的方法模拟第三种的受力情况。



(a) 三维偏心轴压受力 (b) 偏心轴压受力

图 2 偏心轴压受力原理分析图



(a) 轴压受力三维模型 (b). 非均匀受力

图 3 非均匀变力轴压受力原理分析图

## 1.2 钢管 RAC 柱力学性能与几何参数

钢管 RAC 柱组件的材料及参数用实验室已有数据<sup>[13]</sup>。包括: 水泥、砂、水和再生粗骨料, 钢管为 Q235 钢材, 其直径为 165 mm, 长度为 1 200 mm, 其中再生粗骨料取 50%, 以该参数进行建模。核心混凝土和钢管主要参数和强度性能见下表 1。其中壁厚单位: mm, 密度单位:  $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ , 弹性模量单位: GPa, 屈服强度单位: MPa。

表1 钢管材料性能与参数

材料	壁厚	径厚比	密度	弹性模量	泊松比	屈服强度
核心混凝土	—	—	2456	30	0.18	38.3
钢管 1	2	82.5	7850	240	0.3	490
钢管 2	4	41.25	7850	228	0.3	340

## 2 轴向受力数学模型与仿真模型

模型是仿真的基础, 构建一个可信的模型是保证仿真结果可信的关键<sup>[20]</sup>。数字化模型是钢管 RAC 柱工业化真实和虚拟制造系统中产品数据管理(PDM)的重要内容。它将分别与虚拟加工平台、PDM 连接, 支持制造过程<sup>[8]</sup>。精确建模才能使仿真结果正确和优化可靠。以下给出组件受力的数学和三维仿真的数字化模型。

### 2.1 轴向受力数学模型

由式(1)的通用应力数学模型可知, 钢管 RAC 柱组件的轴向受力的极限荷载计算式<sup>[12]</sup>可表达为以下表达式:

$$Pu = \phi A_c f_c (1 + 1.93\xi) \quad (3)$$

$$\xi = A_s f_y / (A_c f_c) \quad (4)$$

$$\phi = 0.88 / (-0.3r2 + 0.45r + 1) \quad (5)$$

式中:  $Pu$  为极限轴向承载力;  $\phi$  为折减系数, 与再生粗骨料取代率  $r$  相关;  $\xi$  为试件套箍系数;  $A_c$  和  $A_s$  分别为核心混凝土、钢管的截面积, 单位  $\text{mm}^2$ ;  $f_c$  为核心混凝土轴心抗压强度, 单位 MPa;  $f_y$  为钢管屈服强度, 单位 MPa, 式(3)详细推导见参考文献 [12, 19]。

### 2.2 钢管 RAC 柱组件轴向受力三维建模

试验时, 通过对组件施加轴压测得其承载力 (见图 1)。用参数化的 CAD 进行建模, 为了模拟试验条件, 则有如下条件设置: 组件与压力主轴加载装置的几何中心重合; 组件底部完全约束, 无位移; 组件材质均匀且各向同性; 在轴压的方向指向组件上表面。选取与试验组件相同的参数, 直径为 165 mm, 长度为 1 200 mm, 壁厚分别为 4 mm 和 2 mm 两种钢管, 其内填充再生粗骨料为 50% 的再生混凝土。基于此, 建立了组件的三维建模, 如图 4。

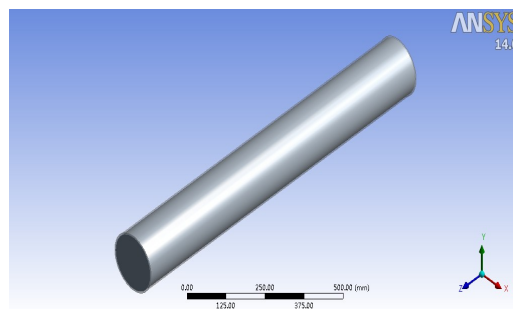


图4 钢管 RAC 柱的三维建模

## 3 组件的轴向不同受力仿真

因组件受力复杂、材料内部组织各元素极限受力临界值不同, 在受力分析与虚拟样机设计时, 常用有限元进行仿真<sup>[21-25]</sup>。虚拟加工平台包括了有限元、运动学和动力学分析 3 个模块<sup>[8]</sup>, 参考该模块的构架, 组件采用仿真环境的 ANSYS Workbench 开发, 以 PDM 为中心, 可通过第 3 方集成为面向用户 CAE 系统, 为后期钢管 RAC 组件的虚拟制造系统开发提供基础数据支持与通信。

模型处理与仿真过程主要包括: 力学分析与模型建立、材料定义、模型组装和属性定义、网格划分、创建和设置参数、定义边界条件、设置加载初始值、增量加载、可视化组件变形分析、仿真结果对比分析。

### 3.1 钢管 RAC 柱组件模型的网格划分

对于钢管 RAC 柱, 设置了 Q235 钢管和 RAC 材料两部分, 分别进行网格划分, 用 Body Sizing 对钢管进行局部细化处理, 单元大小为 5mm; RAC 材料用标准四面体网格划分, 通过 Mapped Face Meshing 定义 RAC 和钢管接触面网格; 全局网格相关度设置为 50, 相关性中心网格细化(Fine)。划分网格后的组件如图 5, 节点 243 760, 单元 68 304, 单元数基本大于 0.6, 表明网格质量较优。

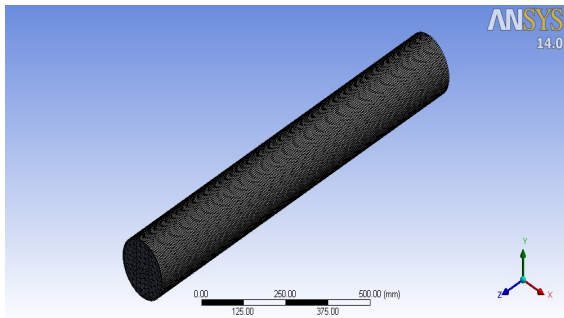


图 5 组件的网格划分

### 3.2 钢管 RAC 柱组件模型的边界设置

钢管 RAC 柱模型采用 Mechanical 直接求解器进行求解, 静力结构分析遵循非线性静力方程, 如式(6)所示, 计算时屈服准则采用 Von Mises 准则, 强化准则采用等向强化, 接触准则采用 No Separation。钢管 RAC 柱组件底部设置固定约束。

$$[K(x)]\{x\} = \{F\} \quad (6)$$

式中:  $[K]$  为刚度矩阵, 非线性比例;  $\{x\}$  为位移矩阵, 应变;  $\{F\}$  为应力。

### 3.3 钢管 RAC 柱组件的仿真试验

在组件三维模型的表面采用 Imprint Faces 分割 RAC 上表面区域。按照均匀、非均匀的偏心和变力的轴向压力受压情况, 把受压面积分为均匀 A 区, 偏心 B 区, 为简化变力施压, 把变力面积分为 C~G 区域, 如图 6 示。对不同区域分别施加轴向压力(见表 2), 实现仿真试验。

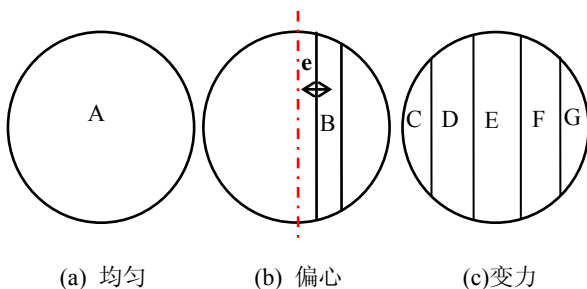


图 6 组件表面力

表 2 组件上表面初始施力值

区域	A	B	C	D	E	F	G
施加荷载/kN	320	320	260	290	320	350	380

#### 1) 均匀轴压仿真试验

将 320 kN 初始仿真载荷均匀施加在钢管 RAC 柱组件上端面(A 区域), 组件缓慢受压, 压力逐渐增加, 直至组件屈服变形。

#### 2) 非均匀的偏心轴压仿真试验

偏心轴压仿真, 通过 Design Modeler 提供的 Imprint Faces 功能在组件上表面建立偏心区域 B, 在 B 上施加 320 kN 初始仿真载荷, 在偏心载荷轴压下, 柱中上部产生缓慢变形, 压力逐渐增加, 直至组件屈服变形。

#### 3) 非均匀的变力的轴压仿真试验

变力轴压仿真, 通过 Imprint Faces 在组件上表面建立 5 个连续区域(C~G), 在 5 个区域上施加变化的初始仿真载荷, 初始载荷在 260~380kN 范围内, 具体(见表 2), 模拟工程中钢管 RAC 柱真实受力情况, 当施加非均匀变力载荷后, 组件呈连续逐渐弯曲变形, 施加载荷越大, 弯曲变形程度越大, 直至组件达到其屈服变形极限。

## 4 组件轴向受压仿真结果与分析

仿真试验结果如图 7 示, 图 7a 为施加均匀轴压力的组件变形图, 图 7(b)、(c)为施加偏心轴压力的组件变形图, 偏心距分别为 25 mm 和 50 mm, 图 7(d)为施加非均匀变力轴压力的组件变形图。

### 4.1 均匀轴压仿真结果与分析

在钢管 RAC 柱组件上端面受均匀加载, 当压力接近极限轴向承载力  $P_u$  时, 端部出现局部变形和局部失稳破坏(见图 7a)。用本实验室组件均匀轴压试验结果与式(1-5)模型计算结果<sup>[12]</sup>、仿真模拟结果进行对比, 结果见表 3。

结果表明, 随着组件厚度增大, 其承载能力逐渐增加; 经验公式计算与试验结果高度吻合, 误差仅为 2.07%和 2.26%; 仿真模拟与试验结果存在一定的误差, 分别为 4.96%和 7.35%, 厚度越大, 产生的误差越大, 但误差在有效范围内, 误差原因可能是再生混凝土材料参数和边界条件假设上与实际试验有偏差, 试验组件存在加工误差。对比结果表明, 精确建模与仿真具有好的可靠性和可行性。

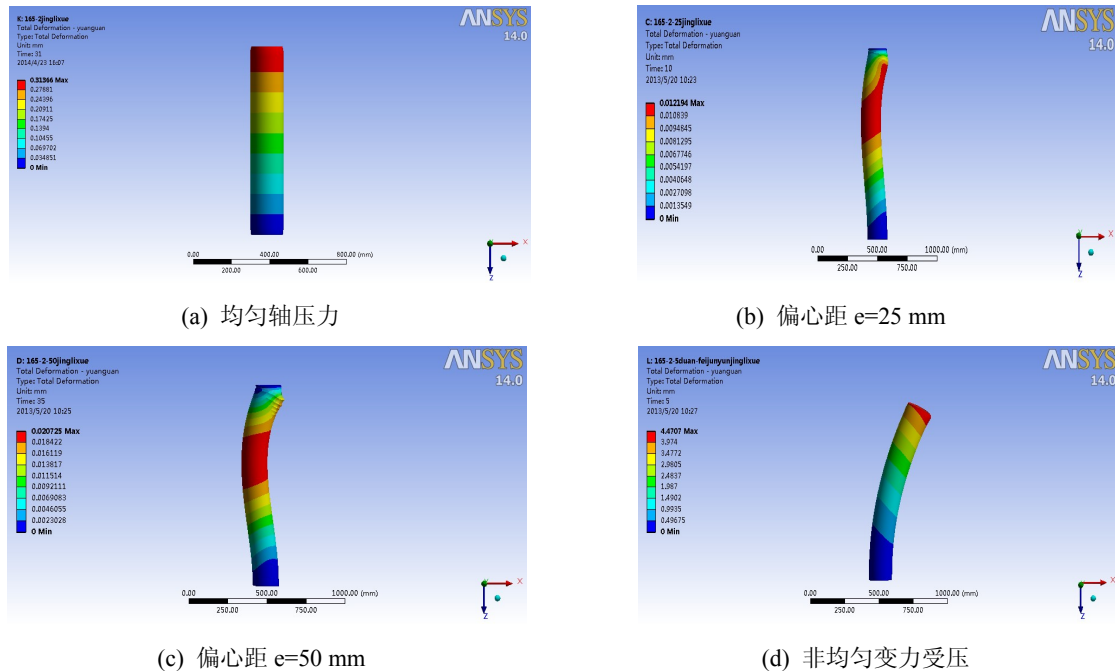


图 7 加载后的组件变形

表3 均匀受压的轴向承载力分析

组件厚度/mm	试验轴向承载力/kN	经验公式轴向承载力/kN	误差%	数值模拟轴向承载力/kN	误差%
2	1 310	1 337	2.07	1 375	4.96
4	1 619	1 582	2.26	1 738	7.35

## 4.2 偏心受压仿真结果与分析

钢管 RAC 柱受偏心轴压时, 压力集中分布在轴心的一侧(图 2b), 是一条近似呈直线的区域, 力均布在该直线上。当偏心距为  $e$ , 压力接近极限承载力  $P_u$  时, 试件中上部出现侧向不规则的弯曲变形, 试件整体丧失稳定而破坏<sup>[9]</sup>, 如图 7b、7c 所示。表 4 给出了偏心距分别为 25 mm 和 50 mm 的组件轴向承载力值, 从表 4 可看出, 偏压组件的轴向承载力和变形与偏心距  $e$  相关。当其它条件相同时,  $e$  越大, 轴向承载力越小。文献[9]做了偏心压力试验研究, 试件尺寸与本文尺寸虽不一致, 但偏心条件下的承载力试验结论与本文仿真结果较吻合, 其偏心受力的力学性能是一致的。

表4 偏心受压和非均匀受压的轴向承载力的仿真

组件 厚度	轴向承载力/kN		
	偏心距 $e=25\text{mm}$	偏心距 $e=50\text{mm}$	非均匀变力
2	611	577.5	755
4	501.5	471	1 103

## 4.3 非均匀变力受压仿真结果与分析

钢管 RAC 柱非均匀变力与偏心轴压有区别, 变力作用于轴端平面上, 力由小逐渐增大, 端面受力是非均匀和连续变化的。因此, 该受力也会产生一定的弯矩并对结构不利。由图 7d 三维仿真可知, 仿真试件的弯曲变形是连续光滑的, 曲线没有突变。非均匀变力轴向承载力的仿真结果如表 4。结果表明, 壁厚越大, 轴向承载能力越大; 组件受变力轴压时, 其轴向受力情况要好于偏心受力情况(图 7), 该结论对设计有重要的参考价值。因此, 工程设计中, 钢管 RAC 柱设计要重视非均匀轴向受压, 避开偏心集中承受轴向力情况。

## 4.4 钢管制造精度对变形的影响分析

在钢管 RAC 柱的材料研究时较少考虑钢管的制造精度。钢管制造时, 焊接时会产生几何缺陷。另外, 钢管填充再生混凝土的制造过程需较长时间, 使表面生锈, 形成了一个薄弱处。因此, 压力



加载到一定值时, 钢管表面出现铁锈脱落, 变形增大, 继续加载后, 试件中部向外凸出, 焊缝处的熔渣开始脱落<sup>[12]</sup>。在仿真中, 管壁局部缺陷通过对模型的屈曲分析, 提取一阶模态的变形并按比例施加在模型上作为初始局部缺陷, 在组件施加轴向压力使得组件产生变形效果, 接近实际压力情况。

## 5 结论

(1) 针对钢管 RAC 柱非均匀轴压问题, 提出了钢管 RAC 柱的非均匀轴向受力的精确建模与仿真, 并给出了均匀、非均匀轴向力的分类, 通过分析均匀、非均匀的偏压和变力轴压的力学性能, 构建了三维压力模型。

(2) 仿真与试验结果对比表明, 均匀轴压承载力大于非均匀承载力, 其仿真与试验结果较吻合。偏心轴向承载力与偏心距相关, 偏心距小承载力大, 仿真与试验结果的偏心力学性能一致。非均匀变力轴向承载能力高于偏心集中式轴向承载力, 该结论对设计有重要的参考价值, 钢管 RAC 柱设计要避免偏心集中受力情况。

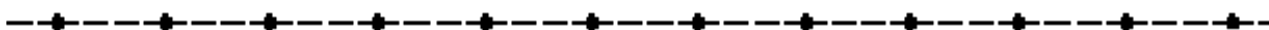
(3) 精确建模与仿真为非均匀轴向受力提供了一种新的手段, 结果验证了计算方法和模型的有效性。

(4) 在上述仿真基础上, 进一步地研究将开发组件的虚拟加工平台模块的虚拟设计、虚拟加工过程优化、虚拟装配三个子模块, 为钢管再生混凝土柱的工业化绿色制造提供平台。

## 参考文献:

- [1] W Y Gao, Jian-Guo Dai, J G Teng, G M Chen. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire [J]. *Engineering Structures* (S0141-0296), 2013, 52(7): 488-501.
- [2] Kathy Bru, Solène Touzé, Florent Bourgeois, *et al.* Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste [J]. *International Journal of Mineral Processing* (S0301-7516), 2014, 126(10): 90-98.
- [3] Yunchao Tang, Wenxian Feng, Ye Zhang. Eccentric and Nonuniform Axial Force Analysis Based on Steel Tube Components of Recycled Resource [J]. *Key Engineering Materials* (S1013-9826), 2014, 579-580: 228-233.
- [4] L J Li, Z B Huang, F Liu. A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables [J]. *Computers and Structures* (S0045-7949), 2009, 87(7-8): 435-443.
- [5] 邹湘军, 孙建, 何汉武, 等. 虚拟现实技术的演变发展与展望 [J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(9): 1905-1909. (Zou Xiang-jun, Sun Jian, He Han-wu, et al. The Development and Prospects of Virtual Reality [J]. *Journal of System Simulation* (S1004-731X), 2004, 16(9): 1905-1909).
- [6] Mustafa Maher Al-Tayeb, B H Abu Bakara, Hanafi Ismailb, *et al.* Effect of partial replacement of sand by recycled fine crumb rubber on the performance of hybrid rubberized-normal concrete under impact load: experiment and simulation [J]. *Journal of Cleaner Production* (S0959-6526), 2013, 59(15): 284-289.
- [7] Noureddine Ferhoune, Jahid Zeghiche. Experimental Behaviour of concrete-filled rectangular thin welded steel stubs (compression load case) [J]. *Comptes Rendus Mécanique* (S1631-0721), 2012, 340(3): 156-164.
- [8] 肖田元, 郑会永, 王新龙, 等. 虚拟制造体系结构研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 1999, 5(1): 56-59.
- [9] 陈宗平, 李启良, 张向冈, 等. 钢管再生混凝土偏压柱受力性能及承载力计算 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45(10): 72-80.
- [10] Jianzhuang Xiao, Wengui Li, Yuhui Fana, Xiao Huang. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011) [J]. *Construction and Building Materials* (S0950-0618), 2012, 31(6) 364-383.
- [11] Wang Zhanfei, Toshitaka Yamao. Ultimate Strength and Ductility of Stiffened Steel Tubular Bridge Piers [J]. *International Journal of Steel Structures* (S1598-2351), 2011, 11(1): 81-90.
- [12] 肖建庄, 杨洁, 黄一杰, 等. 钢管约束再生混凝土轴压试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(6): 92-98.
- [13] 余银银. 钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
- [14] Eduardus A B Koendersa, Marco Pepe, Enzo Martinelli. Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates [J]. *Cement and Concrete Research* (S0008-8846), 2014, 56(2): 203-212.
- [15] 李慧, 蔡文明, 杜永峰. 大体积混凝土底板预埋钢管施工的仿真分析 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(2): 361-366. (Li Hui, Cai Wen-Ming, Du Yong-feng. Simulation of Placing Vertical Steel Tubes in Massive

- Concrete Foundation During Layered Construction Period [J]. *Journal of System Simulation (S1004-731X)*, 2013, 25(2): 361-366.)
- [16] 吴斌平, 任炳昱, 钟登华. 基于边缘优先和空间冲突的拱坝浇筑仿真研究 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(7): 1560-1567. (Wu Bin-Ping, Ren bing-yu, Zhong Deng-hua. Research of Construction Simulation for Arch Dam Based on Margin-priority Principal and Spatial Conflicts [J]. *Journal of System Simulation (S1004-731X)*, 2013, 25(7): 1560-1567.)
- [17] 宋浦, 肖川, 王晓鸣, 顾晓辉. 基于点火增长模型炸药混凝土内爆炸特性研究 [J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(8): 1570-1576. (Song Pu, Xiao Chuan, Wang Xiao-ming, *et al.* Study of Internal-blast Characteristics for Concrete by Ignition and Growth Model of Explosive [J]. *Journal of System Simulation (S1004-731X)*, 2012, 24(8): 1570-1576.)
- [18] 李晓春, 吴胜兴. 基于 ANSYS 的混凝土早期徐变应力仿真分析 [J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(15): 3944-3947. (Li Xiao-Chun, Wu Sheng-xin. Simulation of Early-age Concrete Creep Stress Based on ANSYS [J]. *Journal of System Simulation (S1004-731X)*, 2008, 20(15): 3944-3947.)
- [19] 陈宗平, 柯晓军, 薛建阳, 苏益声. 钢管约束再生混凝土的受力机理及强度计算 [J]. *土木工程学报*, 2013, 46(2): 70-77.
- [20] 张霖, 张雪松, 宋晓, 李伯虎, 等. 面向复杂系统仿真的模型工程 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(11): 2515-2516. (Zhang lin, Zhang Xue-song, Song Xiao, *et al.* Model Engineering for Complex System Simulation [J]. *Journal of System Simulation (S1004-731X)*, 2013, 25(11): 2515-2516.)
- [21] G M Chen, J F Chen, J G Teng. On the finite element modelling of RC beams shear-strengthened with FRP [J]. *Construction and Building Materials (S0950-0618)*, 2012, 32: 13-26.
- [22] 郑浩, 何勇, 郭磊, 等. 卵形弹丸高速正侵彻混凝土靶板的数值仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(7): 1508-1512. (Zheng Hao, He Yong, Guo Lei, *et al.* Numerical Simulations of Normal Penetration of Concrete Target with Ogive-nose Steel Projectile by High-speed [J]. *Journal of System Simulation (S1004-731X)*, 2013, 25(7): 1508-1512.)
- [23] Yan Li, Lei Nie, Bo Wang. A numerical simulation of the temperature cracking propagation process when pouring mass concrete [J]. *Automation in Construction (S0926-5805)*, 2014, 37(1): 203-210.
- [24] Chen Xu, Kunitomo Sugiura. FEM analysis on failure development of group studs shear connector under effects of concrete strength and stud dimension [J]. *Engineering Failure Analysis (S1350-6307)*, 2013, 35(15): 343-354.
- [25] 李丽娟, 黄振华, 刘锋. 用于结构优化设计的改进多目标群搜索算法 [J]. *工程设计学报*, 2013, 20(1): 7-11.



## 《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源, 首次研制发布了 2012 《中国学术期刊国际引证年报》(CAJ-IJCR 年报), 第一次给出了我国 5600 余种中外文学学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序, 发布了“中国最具国际影响力学术期刊”(排序 TOP5%)和“中国国际影响力优秀学术期刊”(排序 TOP5-10%), 在国内外学术界产生了较大反响。之后, 2013 年版年报, 将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前, 2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成, 《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续三年被列入 TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊, 走向世界, 进入国际一流, 指日可待!