

Mechanism of Concrete Filled Steel Tube Subjected to Torsion and Multi-Scale Finite Element Model

Yuanyuan Peng

Infrastructure Planning and Construction Department, Chongqing University, Chongqing
Email: pengyuanyuan1986@126.com

Received: Jan. 5th, 2018; accepted: Jan. 18th, 2018; published: Jan. 25th, 2018

Abstract

In order to make further study on the torsion mechanism of concrete filled steel tube columns, based on the "shell-solid" finite element model in the general finite element program ABAQUS, the analytical results were comprehensively discussed, including the distribution and development trend of the principal stress, principal strain of the steel tube and in-filled concrete of concrete filled steel tube columns subjected to compression-bending-torsion combined load. Using the multi-scale finite element modeling method, the multi-scale model of curved steel-concrete composite girder bridge was built, and the elasto-plastic time-history analysis was made, compared with the fiber beam-column model. The results showed that the global torsion behavior of curved girder bridge could be predicted effectively by the multi-scale finite element model.

Keywords

Concrete Filled Steel Tube, Torsion, Nonlinear, Multi-Scale Finite Element Model

基于有限元模型的钢管混凝土抗扭机理及梁桥地震扭转反应

彭媛媛

重庆大学基建规划处, 重庆
Email: pengyuanyuan1986@126.com

收稿日期: 2018年1月5日; 录用日期: 2018年1月18日; 发布日期: 2018年1月25日

摘要

为了进一步研究钢管混凝土柱在压 - 弯 - 扭复杂受力状态下的抗扭机理, 基于大型通用有限元程序 ABAQUS 中建立的“壳 - 实体”精细有限元模型, 对分析结果进行了深入的分析和探讨, 包括钢管混凝土柱在纯扭、压扭、弯扭等荷载作用下的钢管和内填混凝土中主应力、主应变的分布和变化情况, 揭示了钢管混凝土柱在抗扭时的工作机理。运用桥梁结构的多尺度建模方法, 建立了曲线钢 - 混凝土组合梁桥的多尺度有限元模型进行弹塑性时程分析, 并与纤维梁杆系模型的计算结果进行了对比, 结果表明采用多尺度有限元模型进行桥梁结构整体的变形计算时能够有效预测结构的整体扭转效应。

关键词

钢管混凝土, 扭转, 非线性, 多尺度有限元模型

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于梁桥结构在地震作用下的破坏主要是由于墩柱在往复荷载作用下产生破坏所导致的, 而桥面系及主梁由于刚度较大极少发生破坏[1], 因此对梁桥整体结构采用多尺度有限元模型进行建模则较为合理, 如图 1 中所示。在梁桥结构的多尺度有限元模型中, 对桥面系及主梁采用梁单元进行模拟, 而墩柱仍然采用壳单元和实体单元进行模拟, 桥面主梁和墩柱顶面的节点采用一组约束方程来模拟构件的相互连接。该类模型能够在保证求解精度的同时有效降低整体梁桥结构的节点数量和单元数量, 从而提高求解效率, 并且能够准确的反映出墩柱在往复荷载作用下的受力机理, 包括破坏过程和破坏模式等, 因此多尺度有限元模型也成为了近年来结构体系数值分析模型研究中的一个热点[2] [3] [4] [5]。对于单个桥梁工程结构, 能够获得全面的求解信息, 可以较为准确把握该桥在地震作用下的受力特性。在实际工程设计中, 工程师往往希望获得墩柱的轴力、弯矩、扭矩等内力信息以及曲率、扭率等截面变形参数, 因此杆系有限模型也是常用的桥梁结构分析模型, 但杆系模型无法获取桥墩的局部破坏形态等关键信息, 并且在分析构件中存在非线性扭转行为时具有较大的局限性。

文献[6]-[12]对钢管混凝土柱的抗扭机理进行了深入研究, 为了进一步探讨钢管混凝土柱的抗扭机理并应用于梁桥体系的整体结构时程分析中, 本文首先基于“壳 - 实体”精细有限元模型的计算结果, 以圆形截面钢管混凝土为例, 对钢管混凝土柱在各种复合受扭荷载工况下钢管和内填混凝土的应力应变状态进行了较为详细的分析。钢管混凝土柱的计算参数为: 直径 $D = 220 \text{ mm}$, 钢管厚度 $t = 6 \text{ mm}$, 试件高度 $L = 1100 \text{ mm}$, 混凝土强度 $f_c = 220 \text{ MPa}$, 钢材强度 $f_y = 300 \text{ MPa}$ 。在此基础上, 建立了曲线钢 - 混凝土组合梁桥的多尺度有限元模型, 并同时建立了杆系有限元模型进行弹塑性时程分析结果的对比。

2. 纯扭荷载下的应力 - 应变状态

图 2 中所示为钢管混凝土柱在纯扭荷载作用下的钢管和内填混凝土的主应力和主应变的分布情况。从图中可以看出, 在纯扭作用下, 钢管和内填混凝土中均存在较大的主拉应变和主压应变, 且主拉应变与钢管混凝土柱轴线的夹角小于 45° , 表明钢管混凝土柱在纯扭作用下存在轴向拉应变。另外, 由于混凝土

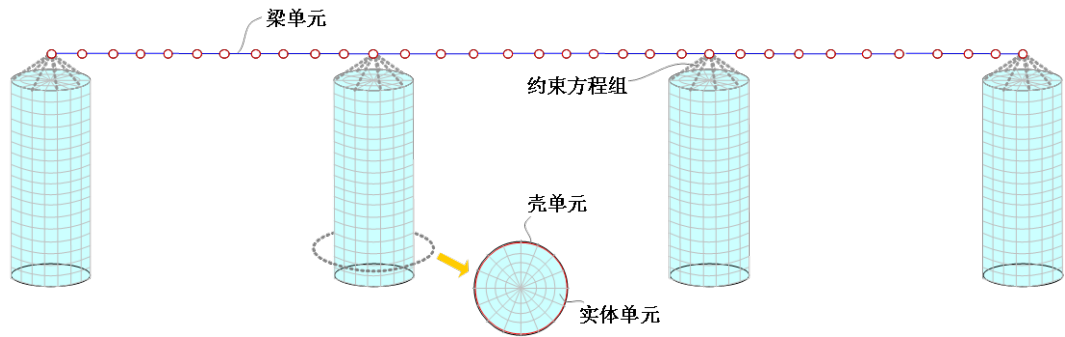


Figure 1. Multi-scale finite element model of girder bridge
图 1. 梁桥体系的多尺度有限元模型

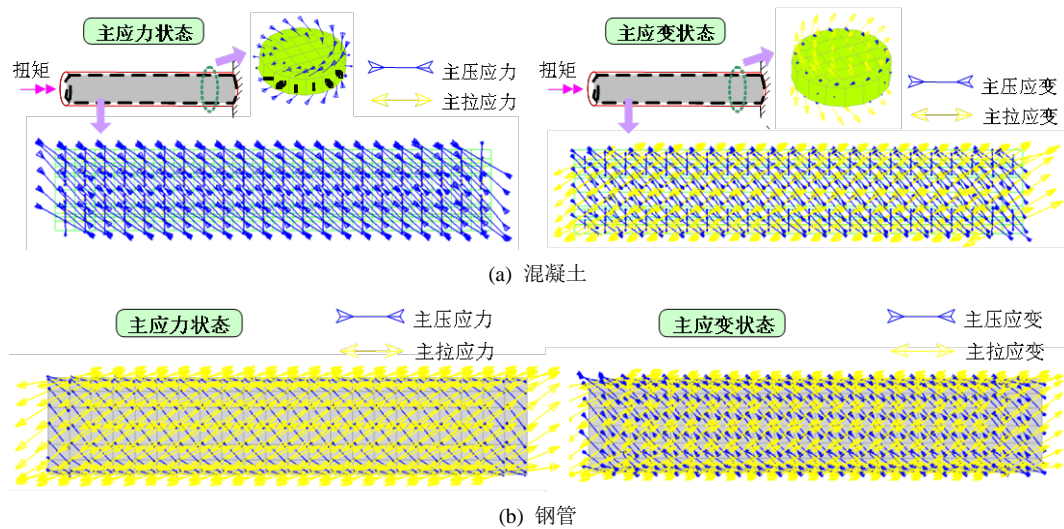


Figure 2. Principle stress and strain state of CFST under pure torsion
图 2. 钢管混凝土柱在纯扭荷载作用下的主应力、主应变状态

土在受拉和受压两个方向上的受力行为差别很大，因此内填混凝土中的主压应力较大而主拉应力较小，且截面上距截面中心的距离越远，混凝土主压应力较大。扭矩的作用导致内填混凝土中形成螺旋斜压杆，而钢管中则相应的形成斜向的螺旋拉力带和压力带。

3. 压扭荷载下的应力 - 应变状态

图 3 中所示为钢管混凝土柱在压扭荷载作用下的钢管和内填混凝土的主应力和主应变的分布情况，轴压比取为 0.4。从图中可以看出，钢管混凝土柱在压扭荷载作用下的主应力和主应变分布与在纯扭荷载作用下时存在相同的规律，但轴压力的存在改变了内填混凝土中螺旋斜压杆、钢管中斜向螺旋拉力带和压力带的角度，主压应力方向与钢管混凝土柱轴线的夹角变小，且混凝土截面上的主压应力分布趋于均匀，表明混凝土的主压应力是由轴压力产生的压应力和扭矩产生的剪应力叠加产生的，轴压力作用下截面上的压应力是均匀分布的，因此钢管混凝土承受的轴压力越大，则混凝土截面上的主压应力大小将趋于一致。

4. 弯扭荷载下的应力 - 应变状态

图 4 中所示为钢管混凝土柱在弯扭荷载作用下的钢管和内填混凝土的主应力和主应变的分布情况，

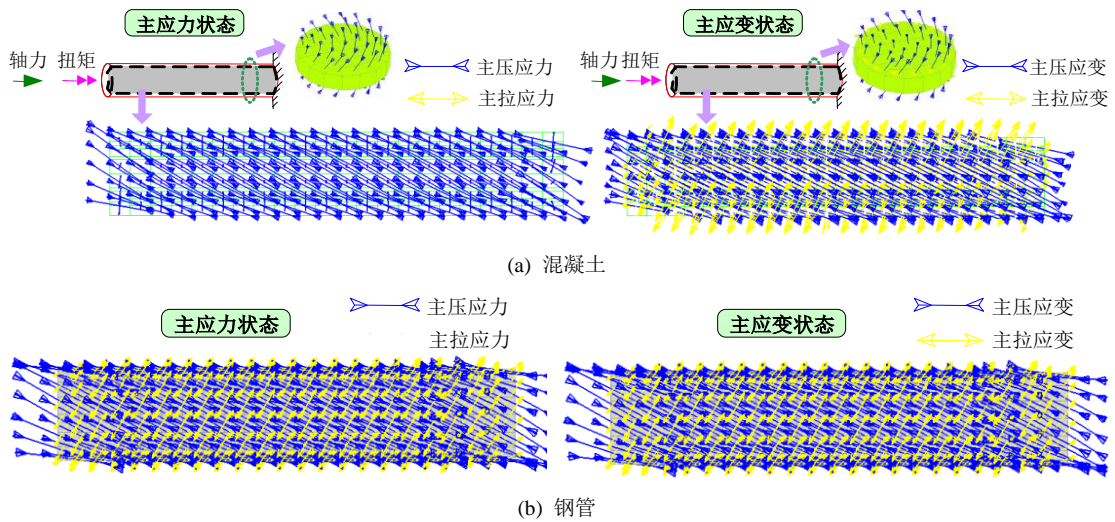


Figure 3. Principle stress and strain state of CFST under compression-torsion

图 3. 钢管混凝土柱在压扭荷载作用下的主应力、主应变状态

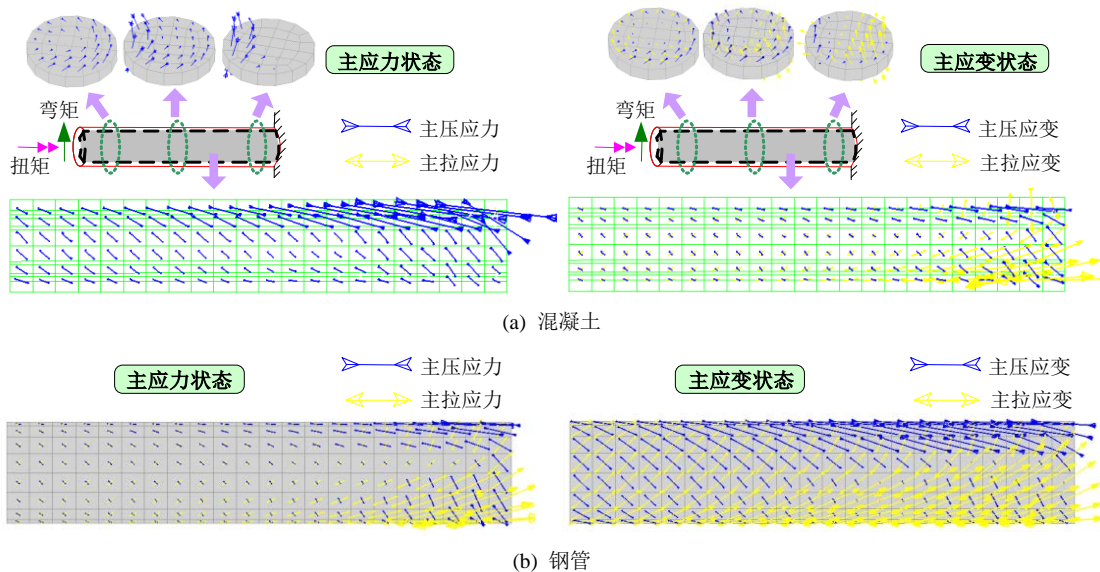


Figure 4. Principle stress and strain state of CFST under bending-torsion

图 4. 钢管混凝土柱在弯扭荷载作用下的主应力、主应变状态

弯扭比取为 1.0。与钢管混凝土柱承受纯扭荷载和压扭荷载时不同，承受弯扭荷载时，由于弯矩沿钢管混凝土柱轴向方向的分布为线性分布，即加载端的弯矩为零，而固定端的弯矩最大。靠近加载端的截面上的主应变和主应力分布接近于纯扭荷载下的分布情况，而靠近固定端的截面上的主应变和主应力分布则由弯矩和扭矩共同作用而确定。因此钢管混凝土中混凝土的螺旋斜压杆的角度将沿轴线逐渐变化，越靠近固定端，其与轴线的夹角越小；而对于同一个截面，弯矩受压侧的混凝土斜压杆的与轴线间的夹角也小于弯矩受拉侧混凝土螺旋斜压杆的角度。对于靠近固定端的截面，由于混凝土抗拉强度低导致弯矩受拉侧的混凝土和钢管的主拉应变较大以及弯矩受压侧的混凝土压应力较大，与钢管混凝土在弯矩作用下的截面应力应变分布规律相似；靠近加载端的截面上的主应力和主应变的分布规律与图 2 中所示的纯扭荷载下的规律相似；位于加载端和固定端之间的截面上的主应力和主应变的分布规律则介于两者之间。

5. 曲线组合梁桥体系时程分析

为了研究钢管混凝土柱的“壳-实体”精细有限元模型用于分析曲线组合梁桥整体结构的地震反应时的适用性, 根据某实际工程中的曲线梁桥的几何尺寸为基础, 分别建立了两种不同的曲线组合梁桥的整桥有限元分析模型, 包括多尺度有限元模型和纤维梁杆系有限元模型, 其中多尺度有限元模型中的墩柱采用“壳-实体”精细有限元建模, 桥面系和纤维梁杆系有限元模型则采用文献[13]中开发的纤维梁单元进行建模。如图5中所示, 共6个桥墩, 等间距布置, 其中墩高9 m, 截面直径1.5 m, 桥面中心线曲率半径为55 m, 圆心角为 90° 。

地震波采用在结构体系的地震反应时程分析中经常采用的 El centro 波, 如图6所示。在 ABAQUS 中, 弹塑性时程分析中共分为两步加载, 首先对结构施加恒定的竖向重力加速度 980 cm/s^2 , 然后施加水平地震荷载, 采用等效水平加速度的方式, 输入方向与两个边墩的连线方向保持一致。

由于桥面系整体的扭转角是曲线桥整体扭转效应的最重要的评价指标, 因此图7给出了多尺度有限元模型和纤维梁杆系模型对曲线组合梁桥墩柱扭转角时程计算结果的对比情况。从图中可以看出, 当地震波沿纵向桥向输入时, 纤维梁杆系模型的计算结果明显偏小, 充分表明多尺度有限元模型分析结果能够有效地反应曲线组合梁桥的墩柱扭转效应。

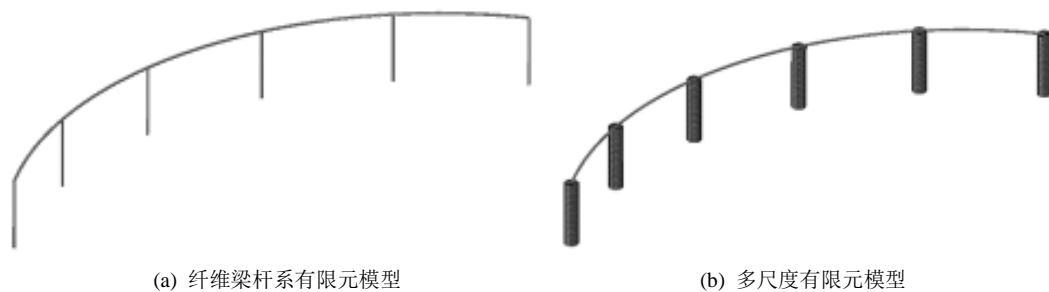


Figure 5. Finite element model of curved composite girder bridges
图5. 曲线组合梁桥的有限元模型

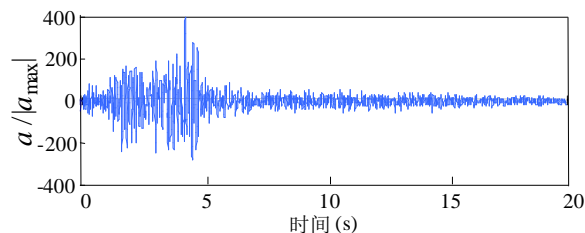


Figure 6. Time history curve of El centro wave
图6. El centro 波时程曲线

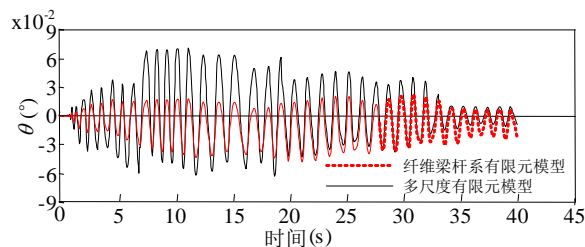


Figure 7. Rotation angle time history results of bridge deck
图7. 桥面系扭转角时程结果

6. 结论

本文基于大型通用有限元程序 ABAQUS 中建立的钢管混凝土柱的“壳-实体”精细有限元模型分析结果,对钢管混凝土柱的抗扭力学行为进行了探讨,揭示了钢管混凝土柱在纯扭、压扭、弯扭等复杂受力状态下的抗扭机理,并将多尺度有限元模型有效应用于曲线组合梁桥整体结构的弹塑性时程分析中,主要结论如下:

1) 钢管混凝土柱在纯扭荷载作用下,受力状态虽然为“纯扭”状态,但由于核心混凝土开裂后为正交异性材料,导致截面存在轴向拉应变,因此钢管混凝土柱的变形状态为“拉-扭”状态。

2) 钢管混凝土柱在压扭荷载作用下,随着截面扭转角的增大,由钢管承担的轴力逐渐降低,而由混凝土承担的轴力逐渐增大,但两者之和始终与外轴力相等,能够保证截面的轴力平衡。轴压力越大,混凝土所承担的轴力越大而承担的扭矩越小,钢管承担的轴力越小而承担的扭矩越大。

3) 钢管混凝土柱在弯扭荷载作用下,弯矩较小的截面应力应变分布规律与纯扭荷载作用时相近,弯矩较大的截面应力应变分布规律与纯弯荷载作用时接近,证明了钢管混凝土柱在弯矩和扭矩复合受力状态下,截面的受力特性与弯扭比密切相关。

4) 当地震波作用沿纵桥向输入时,采用纤维梁杆系模型计算曲线组合梁桥的桥面系扭转角时预测结果偏小,将低估曲线组合梁桥的扭转效应。采用多尺度有限元模型进行结构整体的变形计算时能够获得较为合理的结果。

参考文献 (References)

- [1] 蔡绍怀. 我国钢管混凝土结构技术的最新进展[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 16-26.
- [2] 林旭川, 陆新征, 叶列平. 钢-混凝土混合框架结构多尺度分析及其建模方法[J]. 计算力学学报, 2010, 27(3): 469-475.
- [3] 陆新征, 林旭川, 叶列平. 多尺度有限元建模方法及其应用[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 25(4): 76-80.
- [4] 张政华, 毕丹, 李兆霞. 基于结构多尺度模拟和分析的大跨斜拉桥应变监测传感器优化布置研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 142-148.
- [5] 孙正华, 李兆霞, 陈鸿天. 大跨斜拉桥结构行为一致多尺度有限元模拟[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 68-74.
- [6] Wang, Y.H., Nie, J.G. and Fan, J.S. (2014) Fiber Beam-Column Element for Circular Concrete Filled Steel Tube under Axial-Flexure-Torsion Combined Load. *Journal of Constructional Steel Research*, **95**, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.11.014>
- [7] Wang, Y.H., Nie, J.G. and Fan, J.S. (2013) Theoretical Model and Investigation of Concrete Filled Steel Tube Columns under Axial Force-Torsion Combined Action. *Thin-Walled Structures*, **69**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.03.005>
- [8] Nie, J.G., Wang, Y.H. and Fan, J.S. (2013) Experimental Research on Concrete Filled Steel Tube Columns under Combined Compression-Bending-Torsion Cyclic Load. *Thin-Walled Structures*, **67**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.01.013>
- [9] Nie, J.G., Wang, Y.H. and Fan, J.S. (2012) Experimental Study on Seismic Behavior of Concrete Filled Steel Tube Columns under Pure Torsion and Compression-Torsion Cyclic Load. *Journal of Constructional Steel Research*, **79**, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.07.029>
- [10] Han, L.H., Yao, G.H. and Tao, Z. (2007) Performance of Concrete Filled Thin-Walled Steel Tubes under Pure Torsion. *Thin-Walled Structures*, **45**, 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.01.008>
- [11] Han, L.H., Yao, G.H. and Tao, Z. (2007) Behaviors of Concrete Filled Steel Tubular Members Subjected to Combined Loading. *Thin-Walled Structures*, **45**, 600-619. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.04.008>
- [12] Lee, E.-T., Yun, B.H., Shim, H.J., Chang, K.H. and Lee, G.C. (2009) Torsional Behavior of Concrete-Filled Circular Steel Tube Columns. *Journal of Structural Engineering*, **135**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:10\(1250\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:10(1250))
- [13] 聂建国, 王宇航. 基于 ABAQUS 的钢-混凝土组合结构纤维梁模型的开发及应用[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 70-80.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org