

# 钢管混凝土在压弯扭受力状态下的有限元模型

王宇航<sup>1,2</sup>, 聂建国<sup>1</sup>, 樊健生<sup>1</sup>

(1. 清华大学 土木工程系, 100084 北京; 2. 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 100081 北京)

**摘要:** 为了研究钢管混凝土柱在压-弯-扭复合受力状态下的力学性能, 在大型通用有限元程序 ABAQUS 基础上, 选取合理的材料本构方程, 包括混凝土塑性损伤模型和钢材理想弹塑性模型, 并施加位移约束条件和定义钢管混凝土柱的压-弯-扭复杂受力加载模式, 从而建立钢管混凝土柱的“壳-实体”精细有限元模型. 有限元模型计算结果与文献试验结果吻合良好, 并且能够获得钢管混凝土中钢管和混凝土材料每一点的应力和应变状态, 也能获得宏观扭矩-扭转角滞回曲线, 研究结果充分表明钢管混凝土的“壳-实体”精细有限元模型在兼顾计算精度的同时能够获得较为全面的分析计算结果.

**关键词:** 钢管混凝土; 扭转; 非线性; 精细有限元模型

**中图分类号:** TU398<sup>+.9</sup>

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2013)08-0094-05

## Finite element model of concrete filled steel tube subjected to compression-bending-torsion combined load

WANG Yuhang<sup>1,2</sup>, NIE Jianguo<sup>1</sup>, FAN Jiansheng<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China;

2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, 100081 Beijing, China)

**Abstract:** To study the mechanical behavior of concrete filled steel tube columns subjected to compression-bending-torsion combined load, based on the general finite element program ABAQUS, the suitable material constitutive equations including concrete damage plastic model and steel perfect elastic-plastic model, boundary conditions and combined load conditions were chosen and applied, then the “shell-solid” refined model of concrete filled steel tube columns was established. A good agreement could be observed between the predicted results and test results, and both the stress-strain state of the steel and concrete and the global torsion moment versus rotation angle relations could be obtained, showing that the “shell-solid” refined model had high precisions, and the comprehensive results of concrete filled steel tubes subjected to torsion could be obtained.

**Key words:** concrete filled steel tube; torsion; nonlinear; refined finite element model

钢-混凝土组合结构桥梁由于兼有钢桥和混凝土桥的优点, 适合我国基本建设国情, 近年来得到迅速发展<sup>[1-6]</sup>. 在城市高架桥梁或高速公路高架桥梁的规划和建设中, 经常会出现曲线梁桥和

斜桥的桥梁结构形式. 在曲线梁桥或者斜桥的设计中, 通常会在一个或多个桥墩墩顶进行墩梁固结. 在曲线梁桥中, 由于整体结构的刚度中心与质量中心之间存在一定的偏心距, 在纵桥向水平地震作用下, 墩柱内除了轴力和弯矩外, 还存在扭矩作用, 因而使得梁桥的墩柱处于轴力-弯矩-扭矩复合受力状态.

在复合受力状态下, 桥梁墩柱容易发生破坏, 其破坏机制较为复杂, 并且破坏模式不易预测. 在历次大地震后的震害调查中发现, 墩梁固结的曲

收稿日期: 2012-12-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078206);

“十二五”科技支撑计划(2011BAJ09B01)

作者简介: 王宇航(1985—), 男, 助理研究员;

聂建国(1958—), 男, 教授, 博士生导师;

樊健生(1975—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 樊健生, fanjsh@mails.tsinghua.edu.cn.

线桥、斜桥等空间桥梁结构在地震作用下产生了较为严重的破坏, 见图 1. 因此需要对桥梁墩柱在压-弯-扭复合受力状态下的受力性能进行研究. 本文在大型通用有限元程序 ABAQUS 中, 建立了钢管混凝土柱的“壳-实体”精细有限元模型, 并将模拟计算结果与试验结果进行对比, 证明了模型的有效性.



图 1 墩柱震害

1 单元类型

钢管内的混凝土采用八节点三维实体单元模拟, 钢管采用四节点薄壳单元模拟. 不考虑钢管与混凝土间的粘结滑移, 采用“\* tie”约束方式保证钢管与内填混凝土的共同工作, 即将钢管单元的节点作为从节点, 混凝土单元的节点作为主节点, 在有限元计算中, 从节点的位移通过其附近主节点的位移插值得到, 从而将其刚度矩阵集成到整体刚度矩阵中.

2 材料本构关系

钢管的材料本构采用理想弹塑性模型, 屈服准则采用 von Mises 屈服准则. 内填混凝土的材料

本构采用 ABAQUS 中自带的塑性损伤模型<sup>[7]</sup>, 塑性损伤模型适用于模拟结构构件在往复荷载作用下混凝土材料的本构关系, 并且能够考虑材料在往复荷载作用下的损伤、裂缝开展、裂缝闭合及刚度恢复等行为. 因此本文采用 ABAQUS 程序提供的塑性损伤模型模拟钢管中内填混凝土的材料行为. 混凝土的应力-应变关系曲线采用文献[8]建议的公式计算, 可有效考虑钢管对混凝土的约束效应.

混凝土塑性损伤模型中, 屈服面函数(图 2)为

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} [ \sqrt{3J_2} + \alpha I_1 + \beta < \sigma_{\max} > - \gamma < -\sigma_{\max} > ] - \sigma_{c0},$$

上式中各参数计算公式为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\sigma_{t0}/\sigma_{c0} - 1}{2\sigma_{t0}/\sigma_{c0} - 1}, \\ \beta = \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{t0}}(1 - \alpha) - (1 + \alpha), \\ \gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1}. \end{cases}$$

式中:  $\sigma_{t0}$  为混凝土双轴抗压强度,  $\sigma_{c0}$  为混凝土单轴抗压强度,  $\sigma_{t0}$  为混凝土单轴抗拉强度.

$K_c$  为控制混凝土屈服面在偏平面上投影形状的参数, 若  $K_c = 1.0$ , 则混凝土屈服面在偏平面上的投影为圆形, 类似于经典弹塑性理论中的 Drucker-Prager 准则, 若  $K_c = 0.5$ , 则混凝土屈服面在偏平面上的投影为三角形, 类似于经典弹塑性理论中的 Rankine 准则. 对于普通混凝土,  $K_c$  建议取 0.67.

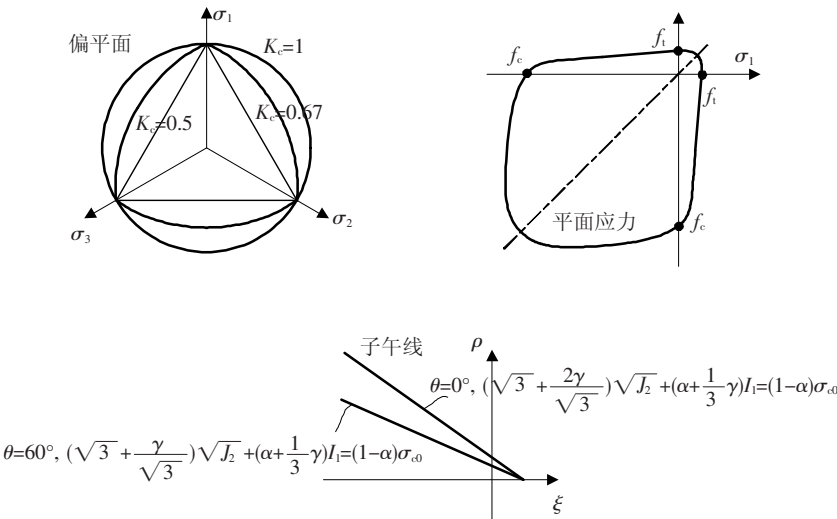


图 2 混凝土塑性损伤模型的屈服面在各应力空间上的投影

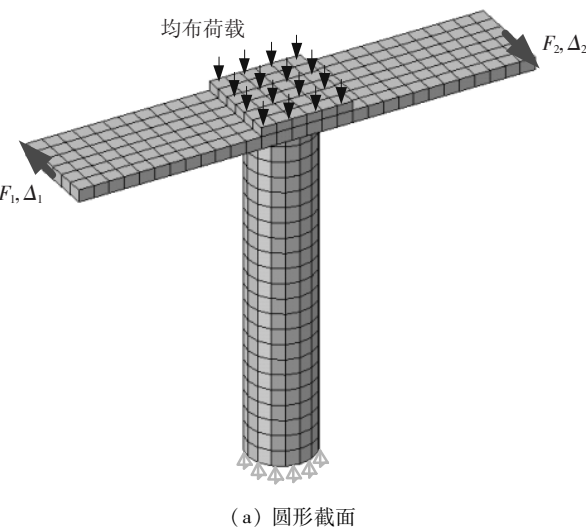
混凝土塑性损伤模型的流动法则采用非关联流动法则,其塑性势函数为

$$G = \sqrt{(\lambda \sigma_0 \tan \phi)^2 + 1.5 \rho^2} + \sqrt{3} \xi \tan \phi.$$

式中:  $\rho = (2J_2)^{0.5}$ ,  $\phi$  为混凝土屈服面在强化过程中的膨胀角,  $\phi$  的取值范围为  $37^\circ \sim 42^\circ$ ,  $\lambda$  为混凝土塑性势函数的偏心距,可取为 0.1.

3 荷载及位移约束条件

图 3 所示为有限元模型的位移约束条件和荷载条件. 位移约束条件为将钢管混凝土柱底部截面的所有节点的 3 个平动自由度和 3 个转动自由度都约束住. 钢管混凝土顶部设置弹性模量很大的加载顶梁, 保证往复轴力、弯矩和扭矩的施加. 在加载顶梁顶部 200 mm × 200 mm 的区域施加轴向均布压力, 实现轴力的施加, 在加载顶梁的两端施加位移荷载, 实现弯矩和扭矩的施加.



在有限元模型中,为了实现不同比例值的弯矩 - 扭矩的同时加载,需要在每一步加载过程中采用迭代的方式进行多个子步的加载. 首先根据弯扭比确定顶梁端部两个加载点集中力间的控制力比  $\beta$ , 然后以其中一个顶梁端部的加载点的位移  $\Delta_1$  为控制目标进行加载后, 得到该点的反力  $F_1$ , 再计算出另一端加载点所需的集中力  $F_2 = \beta F_1$ , 但当  $F_2$  施加于模型上后, 位移控制端的位移和反力将发生变化, 控制位移和两个加载点间的力比都将与目标值存在一定的偏差, 因此需要将位移控制端的每一步控制位移分为多个子步逐级加载, 最终同时达到目标控制位移和控制力比. 根据力的平衡关系, 可以得到柱底截面弯扭比和控制力比间的关系:

$$M/T = \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \cdot \frac{H}{L}.$$

式中  $H$  为柱高,  $L$  为加载顶梁长度的一半.

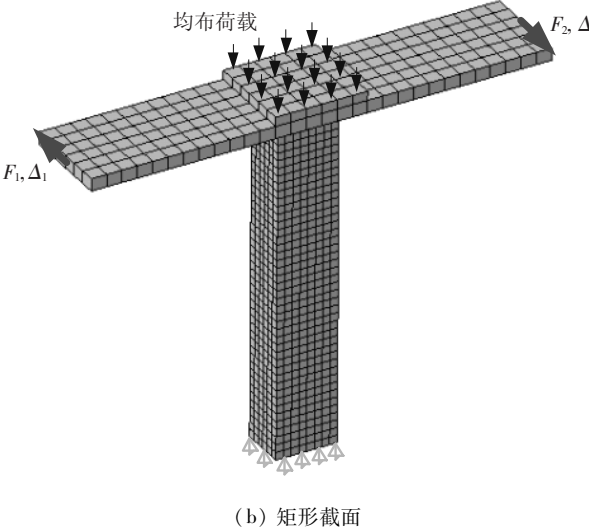


图 3 钢管混凝土柱“壳 - 实体”精细有限元模型

4 试验验证

为了验证本文建立的钢管混凝土柱“壳 - 实体”精细有限元模型的求解精度,对文献[9 - 10]中部分试件的扭矩 - 扭转角滞回关系曲线进行计算. 所有试件的截面直径均为 220 mm, 高度为 1 100 mm, 混凝土强度等级为 C50, 钢管屈服强度为 Q235B. 图 4 为试验结果与“壳 - 实体”精细有限元模型对钢管混凝土柱在压 - 弯 - 扭复合受力状态下的扭矩 - 扭转角滞回关系曲线的计算结果对比. 可以看出, 钢管混凝土柱“壳 - 实体”精细有限元模型的预测结果较为准确, 可有效反映钢管混凝土柱在纯扭、压扭、弯扭和压弯扭等各种包含扭矩的荷载工况下的刚度、承载力和滞回特性.

5 纯扭荷载下的应力 - 应变状态

图 5 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. 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  $45^\circ$ , 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, 混凝土主压应力越大. 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.

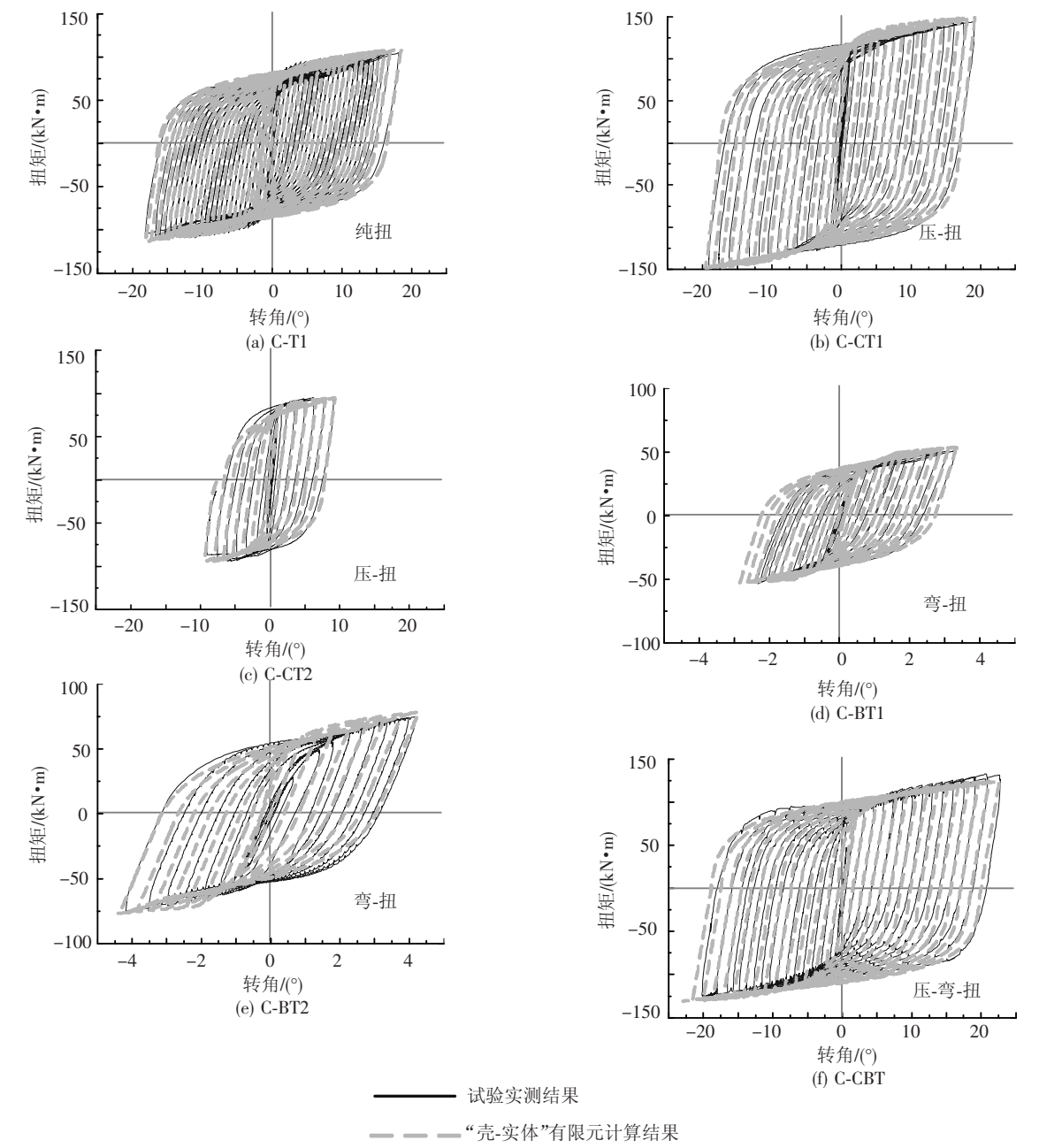


图 4 钢管混凝土柱扭矩 - 扭转角滞回关系计算结果对比

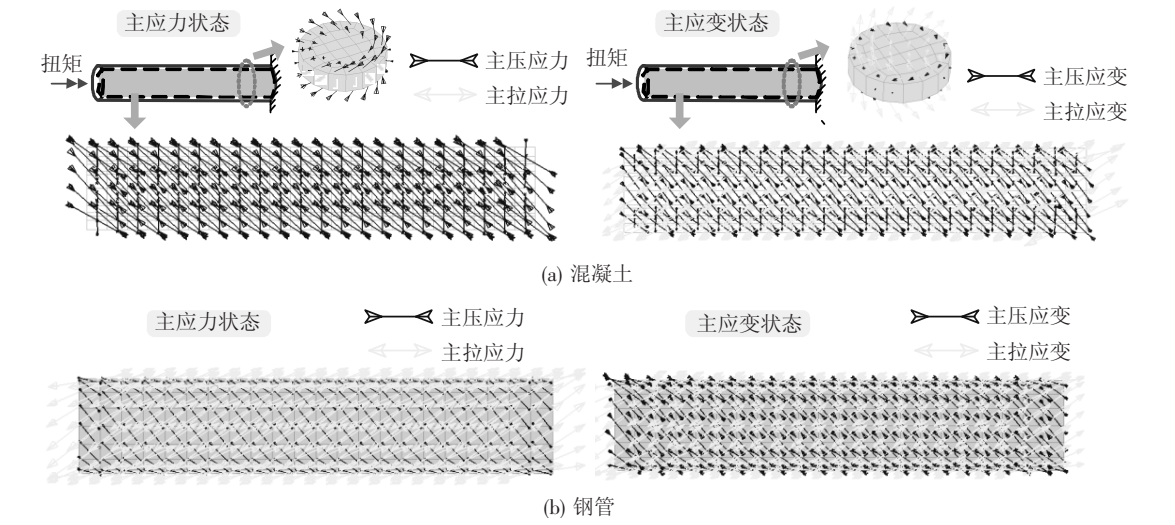


图 5 钢管混凝土柱在纯扭荷载作用下的主应力、主应变状态

6 结 语

本文建立的非线性有限元模型在兼顾计算精度的同时能够获得较为全面的计算结果,可对钢管混凝土柱在压-弯-扭复合受力状态下的力学行为进行有效模拟,可以获得扭矩-扭转角滞回关系等宏观力学行为,也能获得构件中每一点的应力、应变等微观力学特性.

参考文献

[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] 聂建国,余志武. 钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用 [J]. 土木工程学报,1999, 32(2): 3-8.

[3] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展 [J]. 土木工程学报,2012,45(6): 111-122.

[4] 孙国良. 钢-混凝土组合结构及其应用 [J]. 郑州工学院学报,1982, 3(1): 37-51.

[5] 聂建国. 钢-混凝土组合结构原理与实例 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[6] 范立础. 桥梁工程安全性与耐久性——展望设计理念进展 [J]. 上海公路, 2004, 25(1): 1-7.

[7] 聂建国,王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究 [J]. 工程力学, 2013,30(4): 59-67,82.

[8] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践 [M]. 2 版. 北京:科学出版社, 2007.

[9] 聂建国,王宇航,樊健生. 钢管混凝土柱轴压力-弯矩-扭矩空间复合受力拟静力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 1-11.

[10] NIE Jianguo, WANG Yuhang, FAN Jiansheng. Experimental study on seismic behavior of concrete filled steel tube columns under pure torsion and compression-cyclic load [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79(12): 115-126.

(编辑 赵丽莹)