

基于多尺度模型的斜交相贯节点基本力学性能分析

王璐¹, 史庆轩², 戎 翀²

(1. 广东海洋大学 寸金学院, 广东 湛江, 524003; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:斜交网格结构是一种性能优良的新型结构体系,斜柱相交的节点是保证结构安全的关键部位,也是目前研究的重点。基于所提出本构方程,建立关于钢管混凝土斜交网格相贯节点的多尺度有限元建模方法,对节点构件进行算例分析,结果表明此多尺度模型与实体模型模拟结果相似,可以很好地模拟实际构件,大大降低了计算量。基于提出的方钢管混凝土斜交网格相贯节点多尺度有限元模型,对单调荷载作用下的约束参数进行了分析,建议实际工程应用中约束系数 ξ 取值控制在 3.0 以上。设置中心节点板、环向加强板、衬板是一种必要的构造措施,建议取值在 1 倍钢管壁厚。

关键词:方钢管混凝土; 相贯节点; 多尺度模型; 轴向荷载; 数值模拟

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)03-0409-07

Analysis of basic mechanical properties of intersecting connection based on multi-scale model

WANG Lu¹, SHI Qingxuan², RONG Chong²

(1. Guangdong Ocean University Cunjin College, Guangdong Zhanjiang, 524003, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Diagrid structural system is an innovative structural system, which has good mechanical performance, and the key part of it to ensure structural safety is node which is oblique crossed by diagonal column. The node is also the focus of research. Based on constitutive relationship in this paper, multi-scale finite element modeling method of intersecting concrete filled steel tube (CFST) node in diagrid structure is proposed and compared with the test. Result shows that the multi-scale model generally agree closely with the entity model and can be a good simulation of the actual component. It can reduce the amount of calculation by using multi-scale model. Based on multi-scale model of intersecting square CFST node in diagrid structure, constrained coefficient under monotonic loading are analyzed. It is suggested that the value of constrained coefficient ξ in practical engineering be controlled above 3.0. Setting center connecting plate, reinforcement ring plate and lining plate is a necessary structural measure, and it is recommended to take the value of 1 times of the wall thickness of steel pipe.

Key words: square concrete filled steel tube; intersecting node; multi-scale model; axial loading; numerical simulation

斜交网格体系是一种新型结构体系,因其独特的结构特点和美观的建筑外表,在现代建筑结构中的应用越来越广^[1]。最早使用此种结构的是 2004 年在伦敦建成的瑞士再保险塔,其次是美国纽约的赫斯特大厦、多哈的卡塔尔外交部大楼。在国内,于 2009 年在广州建成的广州西塔首次使用此种结构形式,其次是 CCTV 新大楼、大连的中石油大厦、深圳创投大厦等等均采用了这一集受力与建筑美学于一体的斜交网格结构。这种斜交网格结构采用交叉布置的斜柱替代常规结构中的垂直柱系统,其具备同时承受结构竖向和侧向荷载

的高效机制,但该种结构体系延性较差^[2-3]。国内外学者对斜交网格结构的研究主要是利用有限元软件建立宏观模型进行整体受力性能分析,很难反映节点受力以及破坏的详细过程;而节点连接是受力的关键部位,目前关于节点的受力破坏和抗震性能研究主要是利用有限元分析软件建立斜交网格相贯节点三维实体单元模型,其虽可以较好把握局部破坏过程,但计算量较大,收敛性差^[4-5]。故工程计算迫切需要提出一个可以同时模拟结构局部微观破坏和整体宏观行为的计算模型,而多尺度计算就是解决该问题的有效途径。

收稿日期: 2019-10-08 修改稿日期: 2020-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478382); 陕西省自然科学基金基础研究基金重点项目(2016JZ015); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT13089)

第一作者: 王璐(1989—),女,硕士,讲师,主要从事(超)高层建筑研究。E-mail: lwang18@126.com

通信作者: 史庆轩(1963—),男,博士,教授,博士生导师;主要从事抗震和(超)高层建筑研究。E-mail: qingxuanshi@sina.com.

多尺度分析模型是基于尺度分离思想的计算模型,即根据结构构件或节点的复杂程度和破坏过程中的非线性程度,选择适当尺度的分析模型,通过合适的连接方式,实现不同尺度模型之间的协同计算,最终既可以把握结构的整体受力特征又能反映节点实际的受力情况^[6]。多尺度分析模型可在精度和计算代价之间寻求一个较好的平衡点。

基于以上尺度分离思想,本文将对某一圆钢管混凝土斜交相贯节点进行多尺度的分析计算对比,验证多尺度分析模型的合理性和准确性。由于方钢管混凝土构件便于施工处理,稳定性好,具有良好的抗震性能和延性性能^[7-8],应用前景广泛,故应用到轴向受压的斜交相贯节点多尺度模型中,结果表明,本文提出的连接方法能够保证关键节点的计算精度,可以很好地模拟钢管混凝土节点的受力情况,从而为建立适用于高层建筑斜交网格筒结构的多尺度分析模型提供参考。最后基于相贯节点多尺度分析模型,对影响方钢管混凝土斜交相贯节点荷载-位移关系曲线和节点承载力的主要参数进行分析,并得到了各参数对其力学性能的影响规律。

1 模型的建立

斜交网格结构体系节点实验模型中,四根钢管在椭圆连接板处相交,并将四根钢管与椭圆连接板焊接在一起,椭圆连接板厚度为两倍的钢管壁厚,钢管之间的角度为 α ($\alpha=10^\circ\sim 90^\circ$)。在四根圆钢管相交的中心平面形成圆钢管焊接焊缝处有焊接的环向加强板存在,并且环向加强板上、下方的圆钢管上焊接衬板,加劲肋板分布均匀地焊接于环向加强板与环板之间^[4-5],如图1所示。

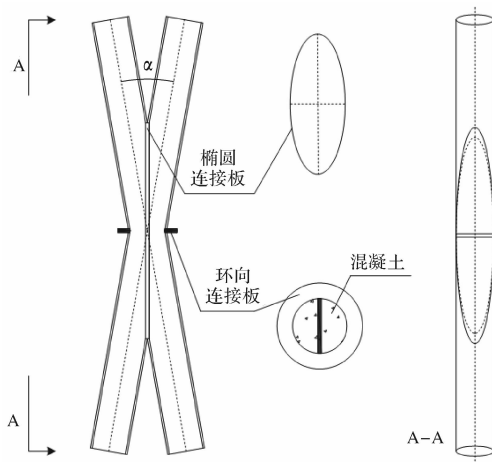


图1 斜交网格节点构造

Fig.1 Joint of diagrid structure

在研究中,利用梁单元钢管和混凝土的本构模型结合有限元分析软件 ABAQUS 的隐式算法,基于 ABAQUS 平台的钢与混凝土结构纤维模型子程序 iFiber LUT 模拟^[9],对钢管混凝土进行模拟。基于 ABAQUS 平台所建立的多尺度有限元分析模型如图2所示,斜交网格节点多尺度模型主要由杆单元与受力关键部位的实体单元组成。杆单元与实体单元的界面连接的关键在于寻找适当方法实现界面处节点数量不对应情况下的变形协调^[10],如图2所示。由于不同尺度模型之间在变形后各点位移一致,可以在 ABAQUS 中利用 Interaction 中的 Coupling 连接功能实现界面耦合,保证结点与连接界面之间转动以及横向位移协调。

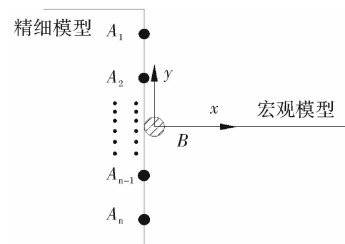


图2 多尺度模型耦合示意图

Fig.2 Multi-scale model coupling diagram

如图3所示,本文主要建立了两种多尺度模型,其中核心混凝土采用实体单元,单元类型为 C3D8R;钢管采用壳单元,单元类型为 S4R;其余部分用梁单元建模,单元类型为 B31,钢管采用 rebar 离散钢纤维模型;模型建成后进行网格划分,核心区域网格划分较密,杆件区域则划分较疏;通过对国内外斜交网格相贯节点研究进行分析^[11-12],可得节点区对杆件区域的影响范围为1.2倍的构件截面宽度,故取多尺度耦合界面位置为1.2B(B为构件截面宽度)。

对于钢管与核心混凝土界面法向方向的接触采用“硬接触”,即垂直于接触面的压力可以完全地在界面间传递。而对于钢管与核心混凝土界面切向力模拟采用库伦摩擦模型,摩擦系数 $\mu=0.6$ 。钢管与混凝土之间的平均界面粘结力,对于圆钢管混凝土可根据 Roeder(1999)^[13]的研究成果,按下式计算:

$$\tau_{\text{bond}} = 2.314 - 0.0195 \cdot (d/t) \quad (1)$$

其中, d 为核心混凝土的直径; t 为钢管壁厚。方钢管混凝土的平均界面粘结力,根据 Morishita 等^[14]的研究成果,约为圆钢管混凝土的0.75倍,因而对于方钢管混凝土,可按式计算:

$$\tau_{\text{bond}} = 0.75 [2.314 - 0.0195 \cdot (b/t)] \quad (2)$$

其中, b 为核心混凝土的边长。

模型中忽略了节点区域的焊缝以及焊接残余应力的影响, 在焊缝处采用 Tie 将钢管与环板以及衬板连接为一个整体。

假定斜交网格柱柱脚固结, 约束 X、Y、Z 方向的平动与转动; 而在斜柱顶端沿轴向施加荷载, 为了得到钢管混凝土相贯节点轴压荷载-变形关系全过程曲线, 计算时采用位移控制的对称加载方式。

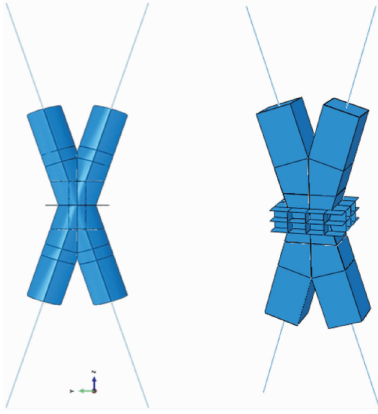


图3 有限元多尺度模型

Fig. 3 Finite element multi-scale model

2 材料本构模型的选取

2.1 混凝土本构模型

本文对钢管混凝土斜交网相贯节点有限元模型进行受力分析时, 混凝土模型采用混凝土塑性损伤模型, 其通过定义损伤因子, 可反映材料损伤引起的结构受力性能变化影响。其参数选取: 弹性阶段核心混凝土的弹性模量 $E_c = 4730 \sqrt{f_c}$ (N/mm²),

当为圆钢管混凝土时 f_c 取圆柱体抗压强度, 当为方钢管混凝土时 f_c 取立方体抗压强度, 泊松比取 0.2。

在钢管混凝土中, 钢管的约束作用使得钢管内的核心混凝土属于约束混凝土, 其延性以及承载力不同于普通混凝土。以往研究表明, 约束混凝土的塑性会有所增加, 主要表现在两方面: (1) 对应峰值应力的应变有所增加; (2) 应力-应变关系曲线上的下降段趋于平缓^[15]。

对于钢管混凝土实体模型, 本文基于双剪统一强度理论^[16], 提出的约束混凝土实用应力-应变关系模型, 以反映钢管混凝土在受力过程中产生的被动约束力对混凝土性能的影响, 表达式如下。

$$\begin{cases} y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3, x \leq 1 \\ y = \frac{x}{\alpha_d(x-1)^n + x}, x \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x = \epsilon/\epsilon_{cc}$, ϵ 为应变值; $y = \sigma/\sigma_c$, σ 为应力值; α_a 为上升段参数, $\alpha_a = 2.4 - 0.0125\sigma_{cc}$; n 为下降坡度系数, $n = 1 + \exp(-3\omega)$, ϵ_{cc} 为约束混凝土峰值应变, 计算公式为

$$\epsilon_{cc} = [700 + 172 \sqrt{\sigma_c + (k-1)p} + 800 (2p/\sigma_c)^{0.2}] \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$k = 1 + \frac{1}{3.5 (p/\sigma_c)^{0.6973}} \quad (5)$$

对于圆钢管混凝土, D 为钢管外径, σ_c 取混凝土圆柱体单轴抗压强度, $p = 2tf_y/D$; 对于方钢管混凝土, D 取截面的外表面边长, σ_c 取混凝土的标准抗压强度, $p = 2tf_y/3D$ 。

基于纤维梁单元模拟核心混凝土的本构模型与实体单元的不同之处在于峰值应力所对应的点是不同的, 采用如下混凝土的受压应力-应变关系模型, 受压应力-应变曲线同样为公式 3, 但公式中 $y = \sigma/\sigma_{cc}$, σ_{cc} 为约束混凝土峰值应力, 计算公式为:

$$\sigma_{cc} = 1.67D^{-0.112}\sigma_c + kp \quad (6)$$

2.2 钢材本构关系模型

杆件与实体模型中, 钢材的本构模型采用 ABAQUS 软件中提供同向弹塑性模型, 满足 Von Mises 屈服准则。这种模型多用于模拟金属材料的弹塑性性能。用连接给定数据点的一系列直线来平滑地逼近金属材料的应力-应变关系, 该模型采用任意多个点逼近实际的材料行为, 因此可十分接近真实的材料行为。塑性数据中将材料的真实屈服应力定义为真实塑性应变的函数^[17]。斜交网格相贯节点所采用钢材多为高强钢材, 因此采用双折线模型, 曲线分为弹性段(oa)、强化段(ab), 如图 4 所示, 弹性模量取 206 GPa, 强化段的弹模取 $0.01E_s$, 弹性阶段泊松比取 0.30, E_s 为钢材的弹性模量。

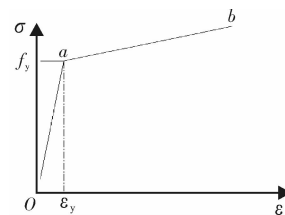


图4 钢材应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of steel

3 多尺度有限元模型算例验证取

3.1 圆钢管混凝土节点模型验证

本文以黄超^[5]所做实验中的圆钢管混凝土斜交网格相贯节点 A-3 试验试件为模拟对象,进行轴压荷载作用下的有限元分析.试件 A-3 设计参数:截面尺寸为 $299\text{ mm} \times 14\text{ mm}$,杆件端部到中心的长度为 $1\ 800\text{ mm}$,试验测得的钢材屈服强度 $f_y = 271.25\text{ MPa}$,混凝土强度为 C60,平面相贯角度 35° .为了更好的分析多尺度模型的准确度,分别建立实体模型和多尺度模型.由图 5 可知,杆件区域约 1.2 倍的斜柱截面宽度范围内,斜交节点的应力一直处于较高的应力水平,故选取的多尺度耦合界面位置合理,可以较好地掌握节点区的受力情况.而试验结果与两种模型的有限元分析结果荷载-位移曲线对比如图 6 所示.

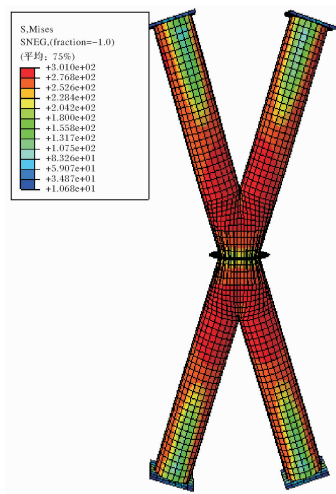


图 5 试件 A-3 Von mises 应力云图

Fig. 5 Von mises stress nephogram of specimen A-3

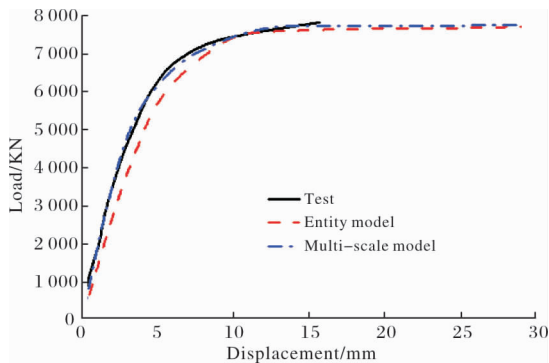


图 6 试验结果与计算结果曲线对比

Fig. 6 Comparison between calculation and test results

由图 6 可知:(1)多尺度模型计算所得曲线与试验曲线非常接近,无论承载力还是后期的延性性能与试验结果均吻合良好;(2)在弹性阶段,实

体模型计算所得曲线与多尺度模型计算所得曲线吻合较差,弹性刚度小于试验值,后期弹塑性阶段曲线吻合较好.总体而言,多尺度有限元模型可以较好地模拟圆钢管混凝土相贯节点在轴向荷载作用下的受压性能.

3.2 方钢管混凝土节点模型验证

目前并没有关于方钢管混凝土相贯节点的试验研究,因此本文以方钢管混凝土相贯节点为模拟对象,建立实体有限元模型与多尺度有限元模型,进行对比分析.试件参数具体如下:方钢管尺寸 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$,壁厚 40 mm ,杆长 $3\ 000\text{ mm}$,斜柱夹角为 35° ,钢材 Q345,核心混凝土为 C40,环向加强版厚度为 50 mm ,加劲板、竖向连接板和衬板的厚度均为 40 mm .两种模型在轴压作用下的荷载-位移曲线对比如图 7 所示,由图可知:采用多尺度有限元模型计算的曲线与三维实体单元计算曲线吻合较好,界面连接实现了变形协调.

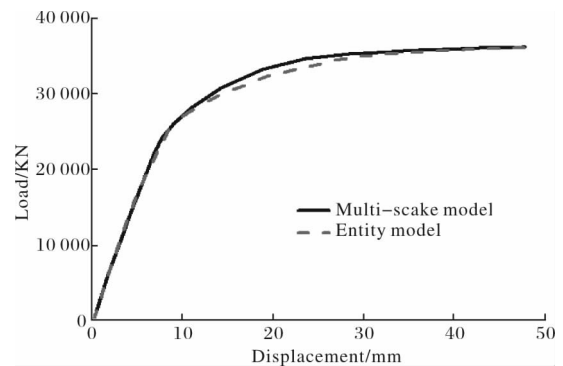


图 7 节点的荷载-位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves of node

另外在计算分析的过程中,得到多尺度模型和实体模型在轴压荷载作用下各构件 Von Mises 应力云图变化如图 8 所示,左侧为实体模型,右侧为多尺度模型.由图可知:

(1)两种模型的应力变化分布基本一致,最大应力值出现的位置也相同,多尺度模型耦合界面上不同单元界面上的应力吻合度较高,界面区域未出现不当的应力集中等问题.说明本文建议的界面耦合连接方法可以实现梁单元宏观模型与壳单元和实体单元等细观模型的不同尺度间的过渡,从结构多尺度分析的目的来看,本文的连接方法保证了关键构件或部位的计算精度;

(2)采用同样的计算平台,对比计算时间,多尺度模型计算所用的时间($4\ 520\text{ s}$)约为实体模型所用时间($6\ 740\text{ s}$)的三分之二.并且达到的计算精度相同,如果应用到高层斜交网格建筑结构计算分析中,会节约更多的时间,节省更多存储.

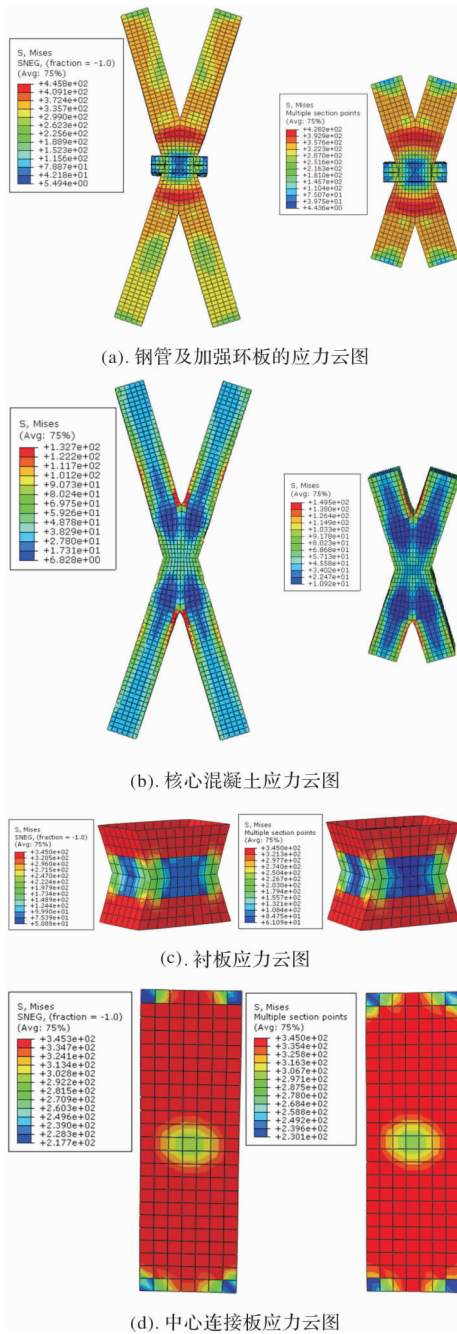


图8 实体模型与多尺度模型应力云图对比

Fig. 8 Comparison of stress nephogram between multi-scale model and entity model

4 相贯节点性能影响参数分析

本文将相贯角度为 35° , 并改变其中某一参数进行单因素有限元数值模拟分析, 以此来考察不同参数对方钢管斜交网格相关节点的性能影响。

节点斜交角度 α 变化时, 得到单肢柱的荷载-位移曲线如图 9 所示。由图可知: (1) 随着斜交角度的增大, 荷载-位移曲线呈上升趋势, 但轴向刚度逐渐减小; (2) 斜交角度为 40° 时, 承载力最大, 之后随之而减小, 这是因为当斜交角度较小时,

节点区钢管向外隆起, 破坏截面发生在相贯节点区域, 随着斜交角度的增大, 钢管屈服位置也随之变化, 其破坏截面逐渐从节点相贯区域过渡到杆件区域, 所以钢管混凝土单肢柱的承载力会下降。从应力云图也可以看出, 在相贯角度为 60° 、 90° 时破坏截面发生在杆件区域, 节点区没有发生破坏, 所以其单肢柱的承载力比斜交角度为 40° 时的承载力低。

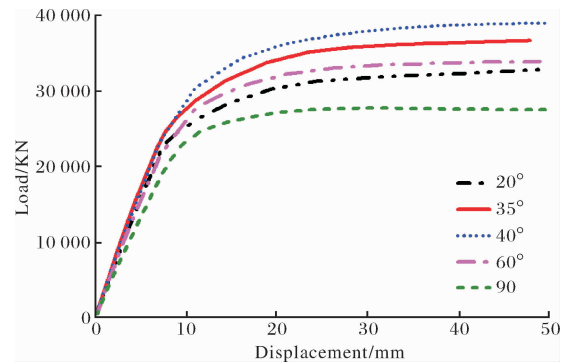


图9 不同斜交角度下的荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of different skew angles

钢管厚度、混凝土强度以及钢材强度这三种参数都与约束系数 ($\xi = A_s f_s / A_c f_{ck}$) 有直接关系, 为考察约束系数对节点性能影响, 分别对这三种参数进行单因素数值分析, 如图 10 所示。由图可知: 当钢管厚度较小或者钢材强度较低或者混凝土强度较高时, 荷载-位移曲线有明显的下降段, 如 AS-10、C80、Q235 对应的曲线。主要是由于在这三种情况下核心混凝土受到的约束力小, 这三个参数都与钢管混凝土的约束系数有关, 此时约束系数 $\xi < 3$; 当宽厚比为 17 左右或者混凝土强度为 C50 左右时, 钢管约束作用明显, 核心区混凝土受到的约束作用逐渐增大, 此时约束系数 $\xi \approx 3$, 荷载-位移曲线大概可分为弹性、弹塑性、塑性三个阶段, 如 AS-30、C50 对应的曲线; 而当宽厚比小于 17 或者混凝土强度低于 C50 时, 计算所得的约束系数 $\xi > 3$, 此时荷载-位移曲线呈明显的上升趋势, 可分为弹性、弹塑性、强化三个阶段, 如 AS-40、AS-50、C30、C40 对应的曲线。通过对比应力云图, 发现随着 ξ 的增大, 节点区的屈服范围逐渐向杆件区域扩大, 节点区承载力达到极限时, 钢管中部向外凸出, 核心混凝土开始交汇处出现应力集中现象。以上分析结果与钢管混凝土的变形特征基本是一致的。因此, 在实际工程中, 为了兼顾工程的适用性和经济性, 应合理选取节点的约束系数, 建议节点危险截面处的约束系数大于 3。

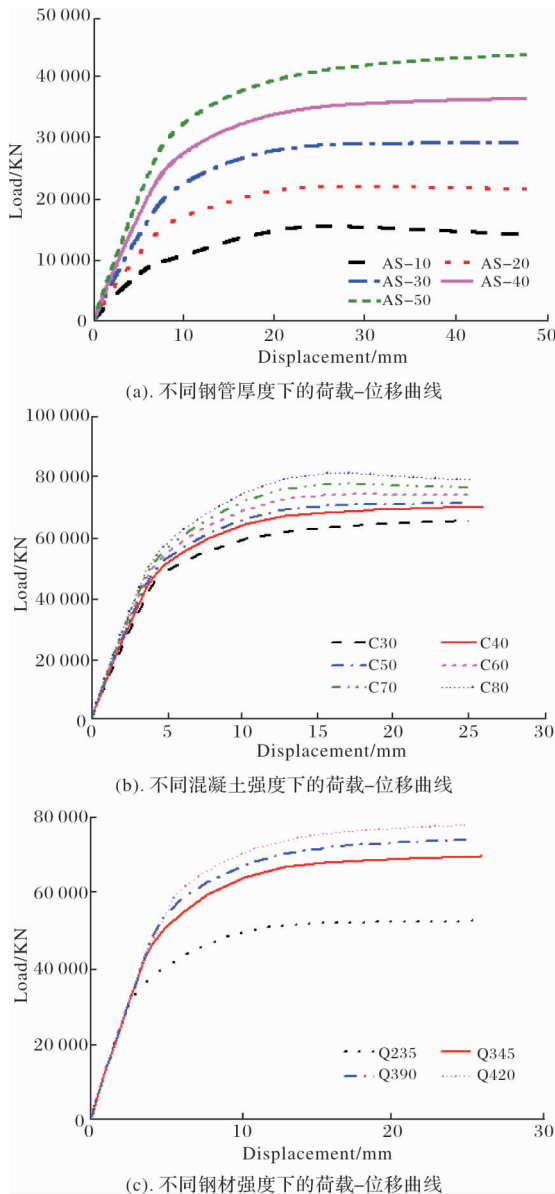


图 10 约束系数相关参数对节点的影响

Fig. 10 The influence of the related parameters of the constraint coefficient

中心连接板厚度与承载力关系如图 11 所示,发现随着竖向连接板厚度的增加,单肢柱和节点承载力呈现非线性的缓慢增大趋势,当竖向连接板厚度较小时,承载力随连接板厚度的变化有所增大,但当竖向连接板厚度超出 2 倍钢管壁厚(此处分析为 40 mm)时,曲线较为平缓.从变形云图(如图 12 所示)可以看出,靠近斜柱交汇处的连接板两侧应力较低(轴向应力),端部出现应力集中(环向应力云图),这主要是因为连接板对核心混凝土提供了较高的环向约束应力.这说明竖向连接板在一定程度上可改善相贯节点力学性能,可作为构造措施进行设置,但厚度可适当取小,取值范围为 1~2 倍钢管壁厚为宜.

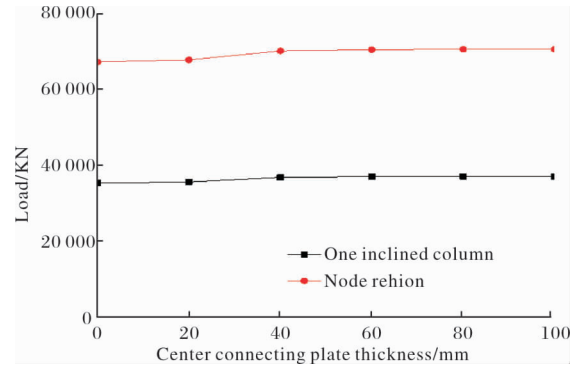


图 11 中心连接板与承载力关系图

Fig. 11 Relationship between center connecting plate and bearing capacity

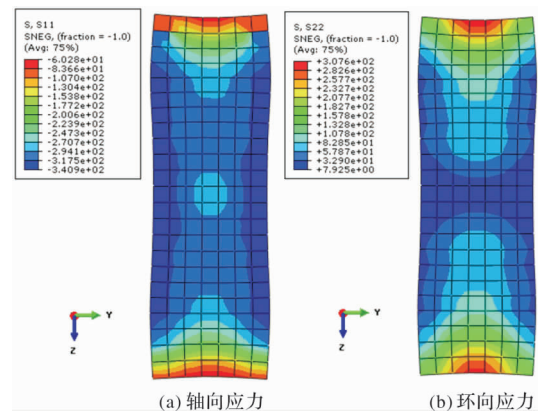


图 12 中心连接板的轴向和环向应力云图

Fig. 12 Axial and circumferential stress nephogram of central connecting plate

通过数值模拟分析发现,衬板厚度的增加对节点承载力的提高不明显.但在同时设置加强环的情况下,加了衬板的相贯节点(A型节点)的屈服范围由节点区域一直延伸到杆件区域,而没有加衬板的相贯节点(B型节点)的屈服范围基本都在节点区域内.由于衬板的作用使节点区域应力最大和首先屈服的位置均发生在其两侧,起到了改善节点区应力集中的作用.如图 13 所示,有衬板的节点区承载力比无衬板的节点区承载力提高了 6%.

通过对 von Mises 云图分析,发现没有设置加强环板的构件在相贯节点的最小截面处,钢管应力为 342.3 MPa,快达到屈服应力 345 MPa,而设置了加强环的构件,在相同截面处钢管应力 285.2 MPa,没有发生屈服.综上所述,设置环向加强板和衬板是一种必要的构造措施,可以有效改善节点区的延性性能,随着它们的厚度的增加,节点承载力有所提高,但厚度超过 1 倍钢管厚度时,节点承载力基本无变化.因此,在实际工程中,建议两者厚度均取值为 1 倍钢管壁厚左右.

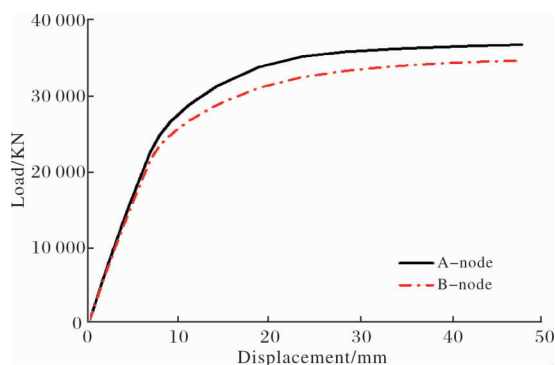


图 13 衬板对节点区承载力的影响
Fig. 13 Influence of lining plate on bearing capacity of joint area

5 结论

本文在已有试验及理论研究的基础上, 基于精细单元模型和多尺度模型这两类有限元模型, 对方管混凝土斜交网格相贯节点在轴压和轴向往复荷载作用下基本力学性能进行有限元分析, 可得以下结论:

(1) 采用非线性有限元软件对已有试验构件分别建立精细模型和多尺度模型, 进行算例验证, 与试验结果对比, 验证本文多尺度建模方法的正确性, 表明本文采用的多尺度建模方法可以运用到钢管混凝土斜交网格相贯节点的研究分析中;

(2) 研究结果表明, 钢管壁厚、钢材强度、混凝土强度对节点承载力的影响可归结为约束系数 ξ 的影响, 建议在实际工程中 ξ 取值控制在 3.0 以上, 以保证方管混凝土相贯节点的安全可靠;

(3) 随着相贯角度的增大, 节点区域承载力逐渐增大, 但轴向刚度逐渐减小, 当相贯角度超过 40° 时, 斜交网格柱的破坏由节点区域转移到杆件区域, 构件的承载力由杆件区域承担; 中心连接板对相贯节点承载力的提高不明显, 可作为构造措施进行设置, 建议厚度取值范围为 1~2 倍钢管壁厚; 衬板及环向加强板对相贯节点性能有一定的改善作用, 可作为必要的构造措施, 建议厚度取值为 1 倍钢管壁厚。

参考文献 References

- [1] KHUSHBU J, PARESH V Patel. Analysis and design of diagrid structural system for high rise steel buildings [J]. Science Direct: Procedia Engineering, 2013, 51: 92-100.
- [2] 黄超, 韩小雷, 王传峰, 等. 斜交网格结构体系的参数分析及简化计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(1): 70-77.

- HUANG Chao, HAN Xiaolei, WANG Chuanfeng, et al. Parametric analysis and simplified calculating method for diagonal grid structural system[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(1): 70-77.
- [3] 史庆轩, 任浩, 王斌, 等. 高层斜交网格筒结构体系抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(6): 8-14.
- SHI Qingxuan, REN Hao, WANG Bin, et al. Seismic behavior analysis of high-rise diagrid tube structural system [J]. Building Structure, 2016, 46(6): 8-14. (in Chinese)
- [4] 史庆轩, 戎翀, 张婷, 等. 基于统一强度理论的钢管混凝土斜交网格平面相贯节点承载力分析[J]. 工程力学, 2016, 33(8): 77-83.
- SHI Qingxuan, RONG Chong, ZHANG Ting, et al. Analysis in bearing capacity of planar intersecting CFST connection in diagrid structure based on the twin shear unified strength theory [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 77-83.
- [5] 黄超. 钢管混凝土斜交网格相贯节点受压性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- HUANG Chao. Research on compressive behavior of intersecting connection of concrete filled steel tubular diagrid structures [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [6] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析-原理、模型与在 ABAQUS, MSC, MARC 和 SAP2000 上的实现[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- LU Xinzhen, YE Lieping, Miu Zhiwei. Construction seismic elastio-plastic analysis-principles, models and implementary in ABAQUS, MSC, and SAP2000[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009
- [7] HU HsuanTeh, CHIUNG Shiannhuang, HSIENWU ming, et al. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(10): 1322-1329.
- [8] UY B. Strength of short concrete filled high strength steel beam columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(2): 113-134.
- [9] 李华伟, 王文达. ABAQUS 二次开发在钢管混凝土结构有限元分析中的应用[J]. 建筑结构学报, 2013, 34: 353-358.
- LI Huawei, WANG Wenda. Application of ABAQUS secondary development in finite element analysis of concrete-filled steel tubular structures [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34: 353-358.
- [10] 石永久, 王萌, 王元清. 基于多尺度模型的钢框架抗震性能分析[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 20-26.

- initial theoretical framework structure of basic public service facilities progressive survey based on the view of subject and complexity science paradigm[J]. *City Planning Review*, 2012(12):84-90.
- [9] 罗卿平,徐雅迪,高佳妮. 乡村旅游引导下的多村整合规划设计——以通济湖水库西岸多村整合规划设计为例[J]. *建筑与文化*, 2019(8):78-79.
LUO Qingping, XU Yadi, GAO Jiani. Multi-village integration planning guided by rural tourism: Taking the planing of villages along Tongji reservoir as an example [J]. *Architecture and Culture*, 2019(8):78-79.
- [10] 陈德绩,章征涛,王玉强. 基于规划实施的民生设施整合探索——以珠海为例[J]. *城市发展研究*, 2018, 25(9): 91-98.
CHEN Deji, ZHANG Zhengtao, WANG Yuqiang. Exploration on integration of public facilities based on planning implementation: A case study in Zhuhai[J]. *Urban Development Studies*, 2018, 25(9): 91-98.
- [11] 王淼,吴松涛. 基于模糊评价法的住区民生服务评价研究[J]. *低温建筑技术*, 2019, 41(8):32-36+47.
WANG Miao, WU Songtao. A fuzzy evaluation approach to the evaluation of livelihood service[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2019, 41(8): 32-36, 47.
- [12] OMER I. Evaluating accessibility using house-level data: A spatial equity perspective[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2006, 3(30): 254-274.
- [13] 叶如海,杨文意,蒋伶,等. 开发权转移中的可转移区域选址模型构建——以南京中心城区江南片为例[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(3): 403-410.
YE Ruhai, YANG Wenyi, JIANG Ling, et al. Construction of transferable regional location mode in the transfer of development rights: Taking the central city of Nanjing as an example [J]. *J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2019, 51(3):403-410.
- [14] SPYRATOS S. Evaluating the services and facilities of European cities using crowdsourced place data[J]. *Environment and Planning B*, 2017, 4(45):733-750.
- [15] OWEN S H, Daskin M S. Strategic facility location: A review[J]. *European Journal of Operational Research*, 1998, 111:423-447.
- [16] BRIMBERG J, ReVelle C. Solving the plant location problem on a line by linear programming [J]. *TOP*, 1998, 6(2):277- 286.
- [17] KARKAZIS J. Facilities location in a competitive environment: A promethee based multiple criteria analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 1989, 42(3):294-304.
- (编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 415 页)

- SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing. Seismic behavior analysis of steel frame by multi-scale calculation method [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(12): 20-26.
- [11] LI L, ZHAO X Z, KE K. Static behavior of planar intersecting CFST connection in diagrid structure [J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2011, 5(3): 355-365.
- [12] HAN X L, HUANG C, JI J, et al. Experimental and numerical investigation of the axial behavior of connection in CFST diagrid structures [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2008, 13(1):108-113
- [13] ROEDER C. W, CAMERON B, BROWN C. B. Composite action in concrete filled tubes [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1999, 125(5): 477-484.
- [14] MORISHITA Y TOMII, YOSHIMURA K. Experimental studies on bond strength in concrete filled square and octagonal steel tubular columns subjected to axial load [J]. *Transaction of Japan Concrete Institute*, 1979: 359-336.
- [15] 贺峰,周绪红,唐昌辉. 钢管高强混凝土轴压短柱承载力性能的试验研究[J]. *工程力学*, 2006, 17(4): 61-66.
HE Feng, ZHOU Xuhong, TANG Changhui. Experimental research on the bearing behavior of high-strength-concrete-filled steel tube under axial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 17(4): 61-66.
- [16] 韩林海,杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
HAN Linhai, YANG Youfu. The technology of modern steel tube confined concrete structures [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [17] 尧国皇. 钢管混凝土构件在复杂受力状态下的工作机理研究[D]. 福州:福州大学, 2006.
YAO Guohuang. Dissertation for the doctoral degree in engineering [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- (编辑 吴海西 沈 波)