

DOI:10.11918/202011001

考虑几何缺陷的钢管混凝土黏结滑移数值模拟

赵卫平¹, 王振兴¹, 陈佳麟¹, 朱彬荣²

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 为研究钢管与混凝土界面黏结机理, 参考规范引入钢管几何缺陷的方式, 以低阶屈曲模态表征钢管整体几何缺陷, 高阶屈曲模态表征钢管局部几何缺陷, 在黏结界面插入面-面接触单元并设置100层接触对, 通过库伦摩擦滑动准则定义界面黏结-滑移行为, 利用ANSYS重启动分析功能实现化学胶结力逐步丧失过程, 建立了含几何缺陷的钢管混凝土有限元模型。模拟结果表明: 钢管低、高阶屈曲模态适用于模拟钢管整体、局部几何缺陷, 叠加后的缺陷大小可模拟 $\pm 0.5\%$ 钢管外径 D 的几何缺陷。有限元模型可对每级荷载步进行检测, 较为准确地描述了推出过程中的时变状态, 成功再现了钢-混黏结界面由试件两端向中部逐步发生剥离的过程。与两类黏结滑移曲线对应的钢管整体几何缺陷为: 形成拐点后呈下降趋势的黏结滑移曲线与直线状母线的低阶屈曲模态对应, 形成拐点后仍缓慢上升的黏结滑移曲线与曲线状母线的低阶屈曲模态对应。钢管局部几何缺陷可归纳为周期性波峰状缺陷, 提出了局部几何缺陷波峰数目与钢管径厚比、黏结长度、混凝土强度之间的经验关系式。

关键词: 钢管混凝土; 有限元; 黏结机理; 接触分析; 几何缺陷

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)10-0052-09

Numerical simulation of bond-slip of concrete filled steel tube considering geometric defects

ZHAO Weiping¹, WANG Zhenxing¹, CHEN Jialin¹, ZHU Binrong²

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To study the bond mechanism of steel tube and concrete interface, referring to the method of setting geometric defects in steel structure design code, low-order buckling modes were used to characterize the overall geometric defects and high-order buckling modes were used to characterize local geometric defects. The contact element was set with 100 layers of contact pairs, and the interface bond-slip behavior was defined by the Coulomb friction and sliding criterion. ANSYS restart analysis function was adopted to realize the gradual loss of chemical bonding force, and the finite element model of concrete filled steel tube with geometric defects was established. Simulation results show that the low- and high-order buckling modes of steel tubes were suitable for simulating the overall and local geometric defects of steel tubes, and the superimposed defect size could simulate the geometric defects of $\pm 0.5\% D$ (D is the outer diameter of the steel tube). The finite element model (FEM) could monitor each load step, describe the time-varying state during the push-out process more accurately, and reproduce the process of the gradual peeling of the steel-concrete bond interface from both ends to the middle of the specimens. The overall geometric defects of the steel tubes corresponding to the two types of bond-slip curves included a downward trend curve after the formation of the inflection point, which corresponds to the low-order buckling mode of the linear meridian, and a slow rise curve after the formation of the inflection point, which corresponds to the low-order buckling mode of the curved meridian. The local geometric defects of steel tubes could be summarized as periodic wave crest-like defects. The empirical relationship between the number of local geometric defect crests and the diameter-thickness ratio of steel tube, bond length, as well as concrete strength was proposed.

Keywords: concrete filled steel tube; finite element model; bond mechanism; contact analysis; geometric defects

大跨越输电铁塔中, 钢管混凝土结构具备解决大直径钢管局部屈曲、改善法兰连接等问题的优势,

已逐渐成为主材构件^[1]。钢管混凝土柱作为主要承载构件, 受多种荷载作用, 复杂的受力状态对钢管和混凝土的协同工作性能提出了更高的要求^[2-3]。钢-混界面黏结性能是二者协同工作的基础, 因此有必要深入研究^[4-6]。

钢-混界面黏结力由化学胶结力、机械咬合力

收稿日期: 2020-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(51474218)

作者简介: 赵卫平(1981—), 男, 博士, 副教授

通信作者: 赵卫平, zhaowp@cumt.edu.cn

和摩擦力三部分组成^[7-8];宏观试验方法主要为推出试验,从力学性能研究界面黏结破坏过程^[9-11]。随着商业有限元软件的日臻完善和普及,越来越多的学者采用数值方法研究钢-混界面的黏结-滑移行为。康希良等^[12]采用接触分析模拟了钢管与混凝土界面作用,结果表明库伦摩擦滑动准则适用于模拟钢-混界面的切向力学行为。王振等^[13]通过在同一节点处设置两个切向和一个法向弹簧单元来模拟钢管节点与混凝土节点的相互作用,发现考虑黏结-滑移时与试验结果较为接近。Hwang 等^[14]提出了等效刚度合并法连接钢管和混凝土界面的有限元模型,得到了当钢管径厚比小于 100 时必须考虑界面黏结作用的结论。文献[15]采用声发射技术对推出过程中钢-混界面黏结-滑移过程进行实时监测,结果显示化学胶结力随推出荷载的增大逐步丧失,钢-混界面的破坏是一个逐步剥离的过程。

目前,国内外学者针对钢-混界面的有限元模型主要有两类:1)在界面定义固定模式的非线性弹簧,这种模型的主要问题是无法反映推出过程的时变状态;2)利用基于库伦摩擦滑动准则的接触分析模型,然而库伦摩擦滑动准则定义的黏聚力(化学胶结力)一直存在,与推出过程中界面剥离的现象相违背。此外,对于输电杆塔中应用的直缝焊接钢管,经过辊压、焊接等工艺成型后存在明显初始几何缺陷^[16],现有的有限元模型未能对此充分考虑。本文采用 ANSYS 参数化语言,通过钢管特征屈曲模态引入了钢管几何缺陷,采用面-面接触分析研究了钢管与混凝土界面的力学行为。模型可对每级荷载步进行检测,自动识别化学胶结力丧失的接触对,利用 ANSYS 重启动分析功能在荷载步之间自动修正界面库伦摩擦滑动准则,对钢管混凝土试件推出过程进行了精细化有限元数值模拟,以探讨钢管与混凝土界面黏结机理。

1 有限元模型介绍

1.1 材料本构关系

混凝土单轴受压的应力-应变关系根据《混凝土结构设计规范》^[17]确定:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{ck} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right], & \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ f_{ck}, & \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

$$n = 2 - \frac{1}{60}(f_{ck} - 50) \quad (2)$$

$$\varepsilon_0 = 0.002 + 0.5(f_{ck} - 50) \times 10^{-5} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0033 - 0.5(f_{ck} - 50) \times 10^{-5} \quad (4)$$

式中: f_{ck} 采用混凝土 28 d 抗压强度实测值,当 n 大于 2.0 时取 2.0, ε_0 为混凝土压应力为 f_{ck} 时的压应变,当小于 0.002 时取 0.002, ε_{cu} 为混凝土极限压应变,当大于 0.0033 时取 0.0033。

混凝土单轴受拉应力-应变关系:

$$\sigma_t = \begin{cases} E_0 \varepsilon_t, & \varepsilon_t < \varepsilon_{t0} \\ 0.6f_{ct} \left(1.2 - 0.2 \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}} \right), & \varepsilon_{t0} < \varepsilon_t < \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (5)$$

式中:混凝土单轴拉力达到抗拉强度后(此时拉应变为 ε_{t0}),拉应力释放到 0.6 倍抗拉强度,当拉应变达到 $6\varepsilon_{t0}$ 后,拉应力降为 0, E_0 为式(1)在原点切线模量, $f_{ct} = 1.8 \times ((f_{ck} + 8)/18)^{0.6}$ ^[18], f_{ct} 为混凝土抗拉强度。混凝土的单轴应力-应变关系曲线见图 1。钢材采用理想弹塑性模型,泊松比为 0.3,弹性模量为 2.06×10^5 MPa。

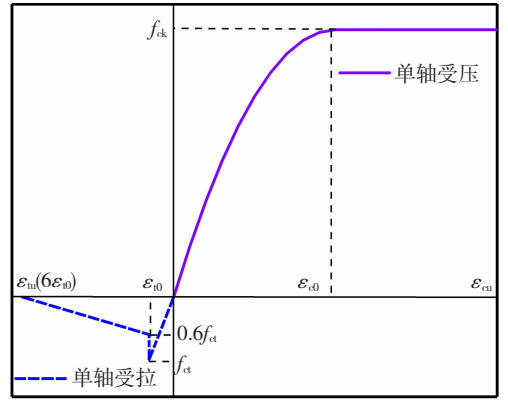


图 1 混凝土的单轴应力-应变曲线

Fig. 1 Uniaxial stress-strain curve of concrete

1.2 单元介绍

混凝土采用 8 结点 Solid65 单元模拟,每个结点有 3 个平动自由度,单元具备开裂、塑性变形等功能;当最大主拉应力超过抗拉强度时,在垂直于主拉应力的方向上形成弥散裂缝,计算时关闭压碎功能。

钢管采用 4 结点 Shell181 单元模拟,每个结点有 3 个平动自由度和 3 个转动自由度,单元支持 Mises 屈服准则,适用于分析薄到中厚壳结构;非线性分析中考虑了壳体厚度的变化,壳面通过 SECOFFSET 命令进行偏移,以减少几何模型建模误差,带厚度的壳面偏移后的位置见图 2。

钢管与混凝土界面插入面-面接触单元,分别是敷在钢管单元内表面的 Target170 和混凝土单元表面的 Conta174。Conta174 单元通过数字输出接触状态(黏结或滑动),为判断黏结界面的黏结-滑移状态提供依据。

1.3 黏结界面的库伦摩擦滑动准则

钢管和混凝土的切向力学行为用库伦摩擦滑动准则^[19]模拟,等效剪力计算式为

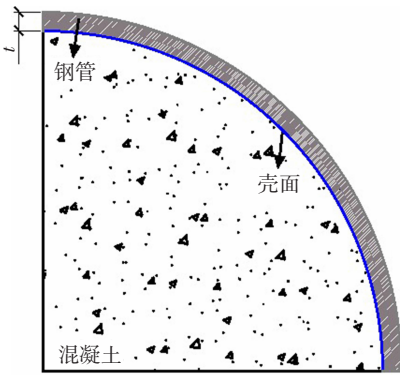


图 2 壳面偏移后位置

Fig. 2 Position of shell surface after offsetting

$$\tau = \tau_a + \mu P \quad (6)$$

式中： τ_a 为化学胶结力， μ 为钢 - 混界面摩擦系数，取室温下轧制钢与混凝土间摩擦系数测试均值 0.281^[18]， P 为法向压力。接触面滑动前界面处于黏结状态，当界面间化学胶结力 τ_a 与初始摩擦力 μP 之和超过容许剪应力 τ_{max} 后进入滑动状态，如图 3 所示的库伦摩擦滑动准则。

根据库伦摩擦滑动准则，接触面发生滑动后化学胶结力 τ_a 仍存在，故不能反映化学胶结力随滑移而丧失的实际情况。本文从加载端到自由端共建立

100 层接触对 (图 4(a))，当某一层黏结界面发生滑移，则使本层界面单元中 $\tau_a = 0$ 。

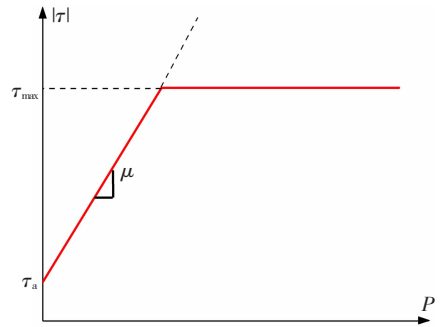


图 3 库伦摩擦滑动准则

Fig. 3 Coulomb friction and sliding criterion

钢管从加载端到自由端平均分为 100 层目标面，目标面前 99 层纵向高度为 $l_a/100$ ，第 100 层纵向高度为 $5l_a/100$ (为混凝土推出预留空间，混凝土最大位移 $\leq 4l_a/100$)，每一层面积用 ($A_{S3} \sim A_{S103}$) 表示，见图 4(b)。混凝土表面覆盖 100 层接触面，与钢管目标面通过实常数 ($R = 3 \sim 103$) 形成接触对，图 4(c) 显示了每一层接触面位置，接触面面积与目标面面积关系： $A_{C3} = A_{S3}$ 、 $A_{C4} = 2A_{S4}$ 、 $A_{C5} = 3A_{S5}$ 、 $A_{Ci} = 4A_{Si}$ ($i = 6 \sim 103$)。

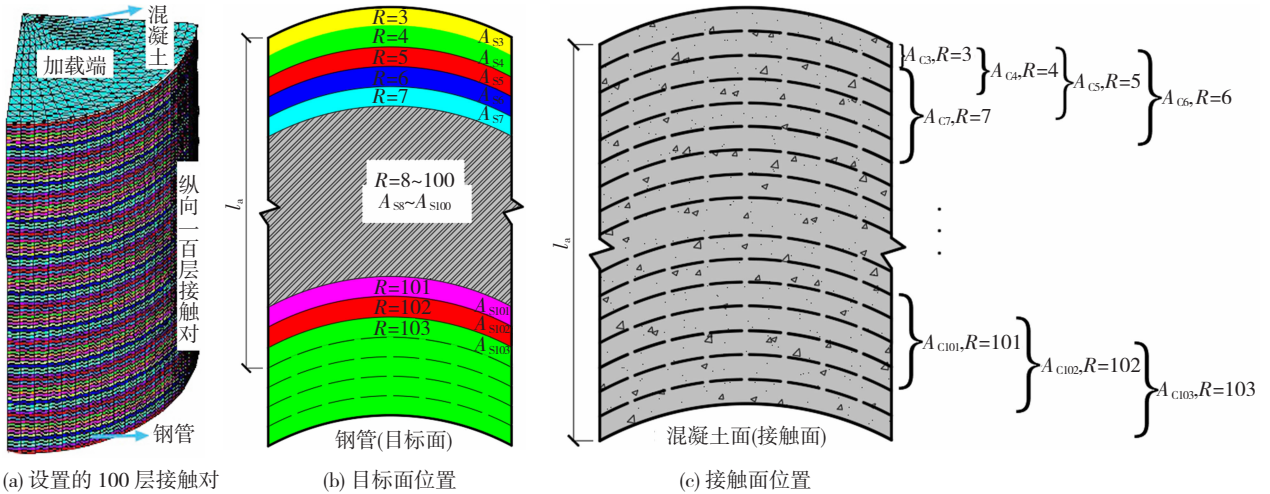


图 4 接触对的设置方式

Fig. 4 Setting of contact pairs

接触分析中，仅实常数相同的接触对会在目标面对应位置计算黏结 - 滑移行为。在混凝土加载端最大位移 $4l_a/100$ 范围内：仅当混凝土加载端位移 $s \leq l_a/100$ ，目标面 A_{S3} 层与接触面 A_{C3} 计算黏结 - 滑移行为；仅当加载端位移 $s \leq 2l_a/100$ ，目标面 A_{S4} 层与接触面 A_{C4} 计算黏结 - 滑移行为；仅当加载端位移 $s \leq 3l_a/100$ ，目标面 A_{S5} 层与接触面 A_{C5} 计算黏结 - 滑移行为；当加载端位移 $s \leq 4l_a/100$ ，目标面 A_{Si} 层始终与接触面 A_{Ci} ($i = 6 \sim 103$) 计算黏结 - 滑移行为。

1.4 直缝焊接钢管加工偏差几何模型概化

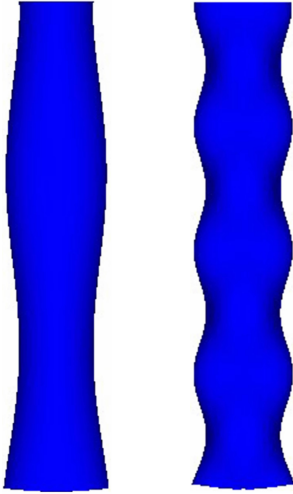
直缝焊接钢管生产工艺主要包括：钢板洗边、卷

曲、合缝、焊接等。在运输、吊装等过程钢管会产生缺陷，焊接会导致残余变形。根据行业规范 T/CEC 136—2017《输电线路钢管塔用直缝焊管》^[20]，直缝焊管外径制作允许偏差为 $\pm 0.5\%$ 钢管外径 D 。钢管制作偏差包括钢管整体内径尺寸沿纵向不一致等整体几何缺陷和钢管局部发生鼓曲、凹陷等局部几何缺陷。有限元模型引入钢管几何缺陷的步骤如下：

1) 建立理想钢管模型，对钢管进行特征值屈曲分析。本文以图 5(a) 中低阶屈曲模态表征整体几何缺陷，以图 5(b) 中高阶屈曲模态表征局部几何缺陷。

2) 用 ANSYS 参数化设计语言，将钢管低、高阶

屈曲模态分析结果的节点位移值存入数组,并将低、高阶屈曲模态的节点位移值叠加,使得钢管最大几何缺陷为 $\pm 0.5\%$ 钢管外径 D ,以此作为钢管初始节点坐标更新钢管几何模型。钢管施加几何缺陷后,四边形壳单元的 4 个结点不一定保持共面,更新几何模型时无法生成面,故需用三角形单元对壳单元进行离散,从而解决结点共面的问题。



(a) 低阶屈曲模态 (b) 高阶屈曲模态

图 5 特征屈曲模态(缺陷放大 50 倍)

Fig. 5 Characteristic buckling modes (defects magnified by a factor of 50)

3)在钢管所有节点位置再次建立混凝土节点,并依次向混凝土内部建立节点,通过节点依次生成混凝土体单元。每个钢管壳单元与混凝土单元的一个表面几何位置对应,由于钢管被离散为三角形单元,故混凝土宜采用四面体单元模拟。四面体单元可由六面体单元拆分得到,图 6 为六面体拆分示意。

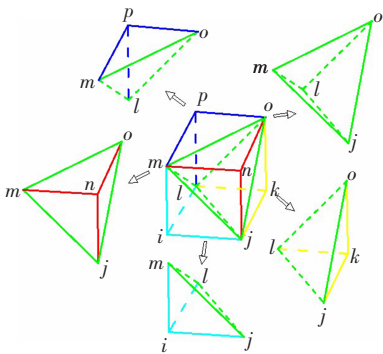
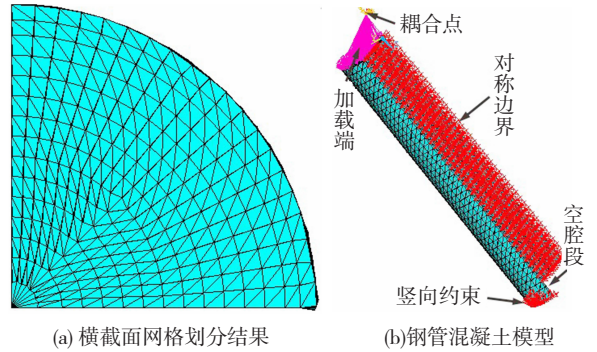


图 6 六面体单元拆分示意

Fig. 6 Splitting schematic of hexahedral element

创建混凝土单元时先找到更新模型前可构成六面体的 8 个节点编号(模型更新前后节点编号保持不变),再在 8 个节点间依次通过节点直接生成四面体单元,以此原则在所有节点间循环生成全部混凝土单元,钢管混凝土横截面网格划分结果见图 7(a)。混凝土下端建立空腔段,为混凝土推出预留空间,钢管混凝土有限元模型见图 7(b)。求解时

钢管和混凝土对称面施加对称边界条件,钢管底面施加竖向约束,混凝土顶面节点耦合于圆心正上方作为加载点。



(a) 横截面网格划分结果

(b) 钢管混凝土模型

图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

1.5 有限元模型计算过程

有限元模型通过特征屈曲模态引入钢管几何缺陷,加载时在荷载步间自动修正库伦摩擦滑动准则并去除发生滑移接触对的化学胶结力,有限元模型计算流程见图 8。重启动分析^[21]在计算荷载步间允许修改参数并继续分析,可实现在原来分析的基础上继续计算,图 8 中在计算荷载步间对化学胶结力赋值为 0 的过程由重启动分析功能实现。

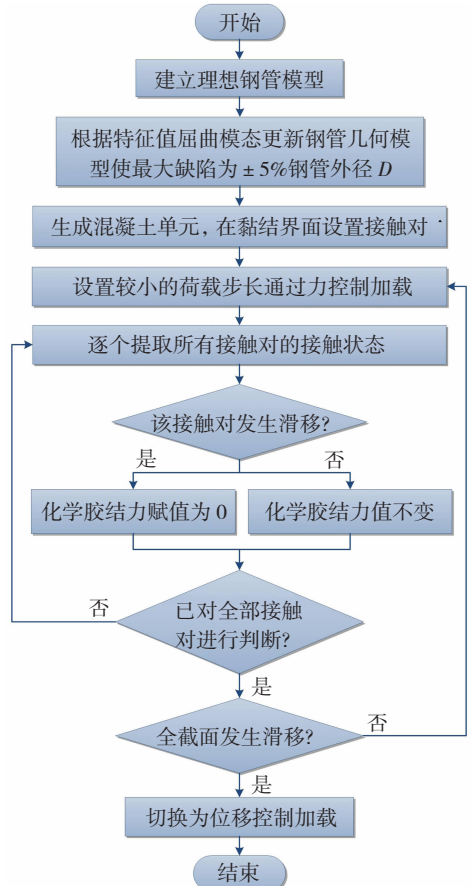


图 8 有限元模型计算过程

Fig. 8 Calculation process of the finite element model

2 试验验证与讨论

2.1 试验验证

为研究直缝焊接钢管与混凝土界面黏结性能,文献[15]以界面黏结长度、混凝土强度、钢管径厚比为主要研究参数,进行了 9 个钢管混凝土试件的推出试验,试件设计参数列于表 1。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	l_a/mm	$D \times t/mm$	f_y/MPa	f_u/MPa	$f_{cu,28d}/MPa$
CFST-A1	350	102 × 4.0	339	451	32.72
CFST-A2	350	203 × 4.5	299	435	42.91
CFST-A3	350	299 × 4.0	339	461	55.34
CFST-B1	500	102 × 4.5	339	451	55.34
CFST-B2	500	203 × 4.5	299	435	32.72
CFST-B3	500	299 × 4.5	339	461	42.91
CFST-C1	650	102 × 4.0	339	451	42.91
CFST-C2	650	203 × 4.5	299	435	55.34
CFST-C3	650	299 × 4.5	339	461	32.72

注: l_a 为界面黏结长度, D 为钢管外径, t 为钢管厚度, f_y 为钢管屈服强度, f_u 为钢管极限强度, $f_{cu,28d}$ 为 28 d 混凝土立方体实测强度。

试验加载采用 1 000 kN 单轴伺服液压试验机,混凝土加载端放置一块直径略小于钢管内径的圆形钢垫块,加载时直接作用于混凝土上端,通过界面黏结力传递给周围钢管,混凝土自由端设置空腔段,为混凝土推出预留空间,加载装置见图 9(a)。混凝土加载端的位移由位移计 D1 和 D2 测定,自由端端位移由 D7 测定,D3 和 D4 测量钢管顶面的竖向位移,D5 和 D6 测量底部支座沉降位移,测点布置见图 9(b)。

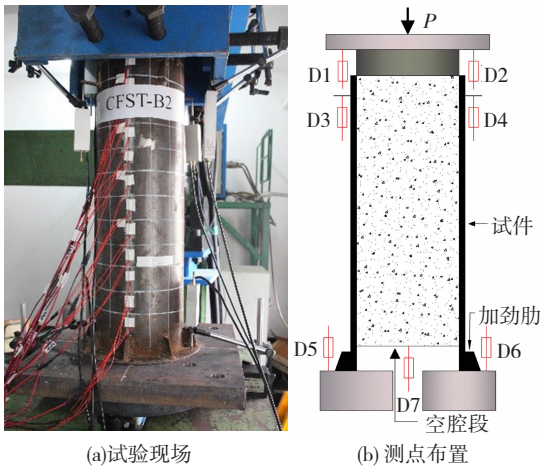
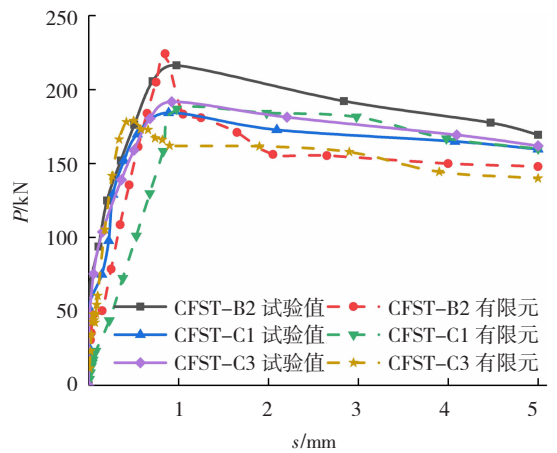
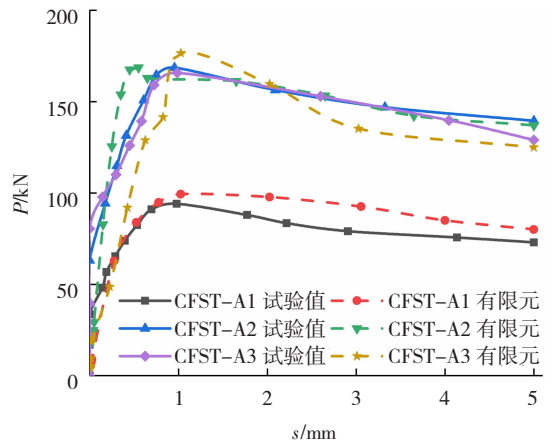


图 9 加载装置

Fig. 9 Test setup

数值模拟得到的加载端荷载-滑移曲线与文献[15]的试验结果对比于图 10,图 10 中数值模拟得到的曲线可分为 I 类(形成拐点后呈下降趋势)、和 II 类(形成拐点后持续上升),为了使对比结果更加

清晰可见, I 类曲线对比结果分两张图给出。从图 10 可得,有限元模型比较准确地反映了钢-混界面黏结-滑移行为,有限元分析结果与试验结果吻合良好。



(a) I 类曲线

(b) II 类曲线

图 10 荷载-滑移曲线 FEM 计算值与试验值比较

Fig. 10 Comparison of load-slip curves between FEM calculation results and test results

2.2 界面黏结机理

图 11 为数值模拟的 I 类、II 类曲线黏结界面接触状态随加载端位移变化过程,其中 I 类、II 类加载端荷载-滑移曲线包括胶结段(OA)、非线性初滑移段(AB)和滑移段(BC、BC'),定义荷载-滑移曲

线上界面发生初滑移时(A点)对应荷载为初始滑移荷载 P_0 , 拐点(B点)对应的荷载为 P_u 。有限元分析结果得到的各阶段黏结机理如下:

胶结段(OA):从图 11 中①处接触状态可得,加载初期界面处于黏结状态,加载端混凝土和钢管均发生等量的弹性压缩变形,界面无相对滑移产生。

非线性初滑移段(AB):图 11 中②处接触状态表明,当加载端荷载达到 P_0 , 加载端黏结界面先发生相对滑移并逐步向混凝土中部发展,黏结界面发生滑移是由于混凝土与钢管发生了不协调变形。随着加载端荷载增大,自由端黏结界面开始出现相对滑移,见图 11 中③处接触状态。加载端荷载逐渐增大,钢-混黏结界面由两端向中部逐步剥离,最终发展为全截面剥离,见图 11 中④处接触状态。

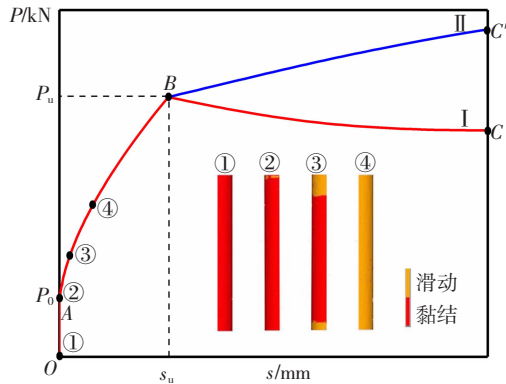


图 11 黏结界面滑移发展过程

Fig. 11 Development process of bond interface slippage

滑移段(BC/BC'): I类曲线在滑移段呈下降趋势。I类曲线试件钢管整体几何缺陷特征:钢管母线为直线,如图 12 所示,为更直观表示缺陷的形式和位置,图中显示的缺陷变形值是实际缺陷的 50 倍。

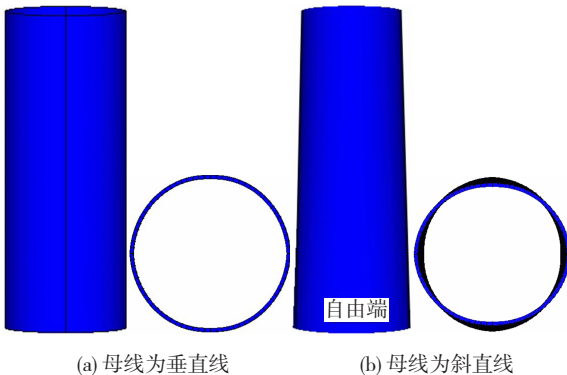


图 12 I类曲线整体几何缺陷(缺陷放大 50 倍)

Fig. 12 Overall geometric defects of type I curves (defects magnified by a factor of 50)

混凝土推出过程中有限元计算的钢管纵向应力分布如图 13(a)所示,在钢管局部凸起或者凹陷处纵向应力较大。钢-混界面产生相对滑移时,钢管几何缺陷受到挤压产生法向应力 P , 提供一定的机

械咬合力和摩擦应力 μP , 应力大小主要与缺陷大小与形状相关,见图 13(b)。图 14 为 I类曲线滑移段摩擦应力随滑移变化过程,从图 14 得,滑移段状态⑥处摩擦应力比状态⑤处分布均匀,且摩擦应力数值小于状态⑤中的摩擦应力。由于滑移量增大,混凝土与钢管界面契合程度降低,整体几何缺陷形式也导致钢管约束能力降低,摩擦应力逐步分布均匀,局部摩擦应力受几何缺陷大小和形状影响而降低。在滑移段,由于机械咬合力与摩擦阻力两者之和小于荷载 P_u , I类曲线达到荷载 P_u 后出现下降段。

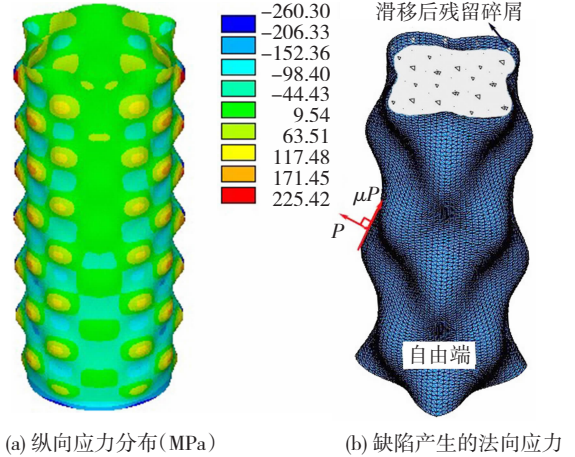


图 13 滑移后纵向应力的分布与产生机理(缺陷放大 50 倍)

Fig. 13 Distribution and mechanism of longitudinal stress after slipping (defects magnified by a factor of 50)

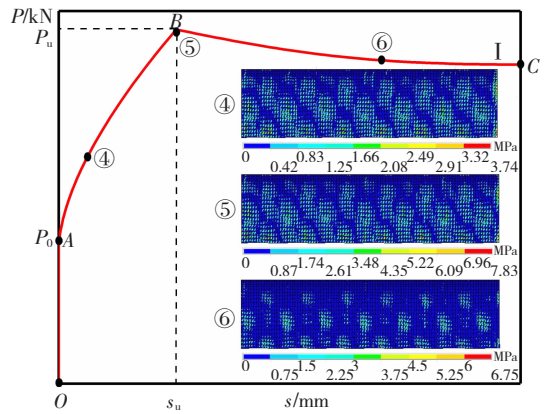


图 14 I类曲线摩擦应力发展过程

Fig. 14 Development process of friction stress in type I curves

II类曲线在滑移段持续上升。II类曲线试件钢管整体几何缺陷特征:钢管母线为曲线,见图 15。当加载端荷载达到 P_u 后,钢管存在明显的锥楔作用,混凝土推出时钢管整体约束能力增强。图 16 为 II类曲线滑移段摩擦应力随滑移变化过程,从图 16 得,状态⑥局部摩擦应力略大于状态⑤中的摩擦应力,但比状态⑤分布均匀。由于滑移量增大,混凝土与钢管界面契合程度降低,钢管对混凝土约束能力降低,削弱了整体几何缺陷的锥楔作用,摩擦应力

逐步分布均匀,局部摩擦应力的分布受几何缺陷影响增大。滑移段由于机械咬合力和摩擦阻力之和大于荷载 P_u , II 类曲线达到荷载 P_u 后持续上升。

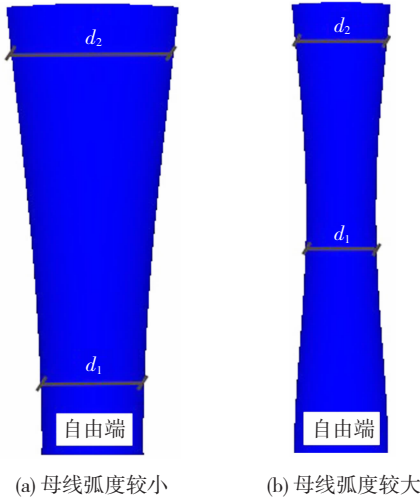


图 15 II 类曲线整体几何缺陷 (缺陷放大 50 倍)
Fig. 15 Overall geometric defects of type II curves (defects magnified by a factor of 50)

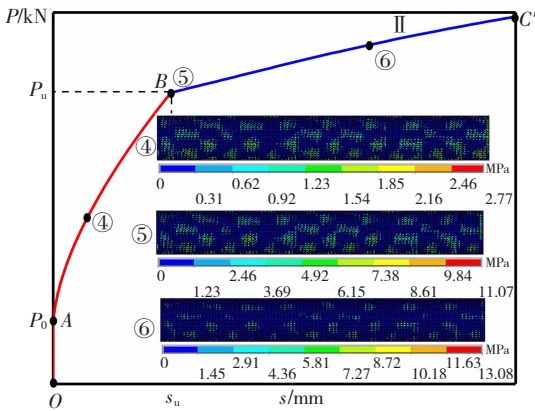


图 16 II 类曲线摩擦应力发展过程

Fig. 16 Development process of friction stress in type II curves

2.3 混凝土裂缝发展规律

随着黏结界面发生滑移,加载端黏结界面混凝土出现裂缝后自由端混凝土也出现裂缝,最终发展至整个黏结界面,如图 17 中显示的混凝土裂缝发展过程。混凝土界面裂缝分布并不均匀,在钢管几何缺陷较大、密集区域更为明显。由于钢管存在几何缺陷,混凝土发生整体滑移时界面受到缺陷的反复挤压,混凝土裂缝会由黏结界面发展至混凝土内部,见图 17 中⑤处混凝土裂缝分布。

2.4 钢管几何缺陷引入方法

实测几何缺陷是最可靠的方法,但对于庞大的工程结构实体既不经济也不现实。参考中国 GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[22]中柱引入初始缺陷的方法,柱面的初始缺陷可按低阶整体屈曲模态采用:柱初弯曲取为柱高的 1/1 000。对于直缝焊接

钢管,钢管加工偏差包括整体几何缺陷和局部几何缺陷,只采用低阶屈曲模态引入缺陷,不能对局部几何缺陷进行考虑,对钢管实际存在的缺陷考虑不够全面,仍有完善的空间。本文根据规范钢管特征屈曲模态计算缺陷的方法,共对 9 个考虑初始缺陷的钢管混凝土进行了计算并完成试验验证,旨在提出经验性选取钢管几何缺陷的方式,为实际应用考虑几何缺陷方法提供参考。

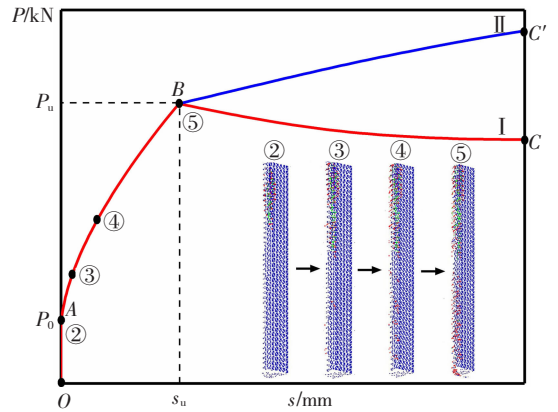


图 17 混凝土裂缝发展过程

Fig. 17 Development process of concrete cracks

钢管几何缺陷引入方法包括整体几何缺陷、局部几何缺陷引入方法。从 2.2 节试算知,直缝焊接钢管荷载-滑移曲线类型与钢管几何缺陷形式相关。整体几何缺陷根据低阶屈曲模态引入, I 类曲线试件钢管整体几何缺陷可引入低阶屈曲模态中钢管母线为直线的模型, II 类曲线试件可引入低阶屈曲模态中钢管母线为曲线的模型。

局部几何缺陷根据高阶屈曲模态引入,结合试算结果归纳各个试件高阶屈曲模态,发现试件高阶屈曲模态均呈显著波浪状,见图 18。将图 18 中局部几何缺陷定义为周期性波峰状缺陷,完整的波峰定义为一个,钢管端部不完整的波峰定义为半个,则图 18 中每一纵列波峰个数均相同(7 个),并将图 18 中纵向每一列波峰数目定义为波峰数量 N_{CAL} 。

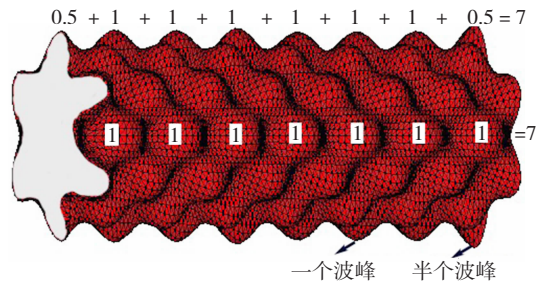


图 18 周期性波峰状缺陷 (缺陷放大 50 倍)

Fig. 18 Periodic wave crest-like defects (defects magnified by a factor of 50)

为研究钢管局部几何缺陷引入方法,建立试件径厚比 D/t 、界面黏结长度 l_a 、混凝土强度 f_{cu} 与波峰

数量 N_{CAL} 经验关系式,见式(7)。公式计算的波峰数目与有限元模型采用的波峰数目对比于图 19,整体误差较小。公式可作为高阶屈曲模态选取方式的计算原则,具体方法是先根据公式计算不同试件周期性波峰状缺陷的数目(四舍五入取整数),匹配对应的高阶屈曲模态阶数,再作为局部几何缺陷引入。

$$N_{CAL} = (0.00282D/t + 0.00643I_a + 1.56969)(f_{cu}^{0.5} - 4.43031) \quad (7)$$

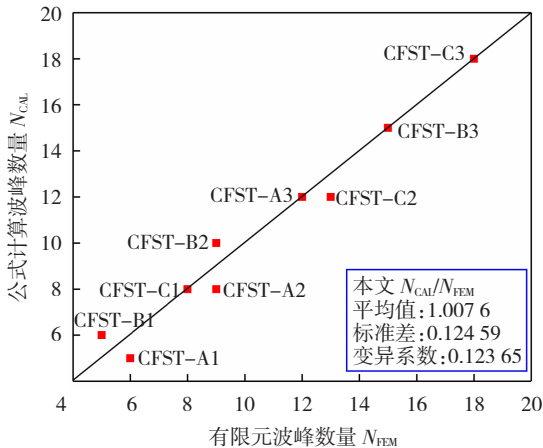


图 19 波峰数量对比结果

Fig. 19 Comparison of crests numbers

3 结论

本文建立了 9 个含几何缺陷的钢管混凝土有限元模型,对推出过程钢-混界面时变状态进行检测并在荷载步之间修正库伦摩擦滑动准则,对钢-混界面黏结机理进行了分析,得到如下结论:

1) 数值模拟结果与试验曲线对比表明,本文有限元模拟方法具有较好的适用性,实现了钢管混凝土构件随加载端荷载增大黏结界面由两端向中部逐步发生剥离,混凝土裂缝由黏结界面向截面中心发展的变化机制。

2) 有限元细部分析结果可弥补宏观试验的不足,模拟结果表明钢管局部缺陷处纵向应力更显著,摩擦应力不均匀程度明显,摩擦应力随着界面滑移值增大逐渐趋于均匀分布。

3) 低阶屈曲模态可以表征钢管整体几何缺陷, I 类曲线(形成拐点后呈下降趋势)钢管整体几何缺陷的特点是钢管母线为直线, II 类曲线(形成拐点后仍缓慢上升)钢管整体几何缺陷的特点是钢管母线为曲线。

4) 高阶屈曲模态可以表征钢管局部几何缺陷,钢管局部几何缺陷为周期性波峰状缺陷,提出了波峰数目与径厚比、界面黏结长度、混凝土强度等参数的经验计算式。

参考文献

- [1] 朱瑞元,李喜来,廖宗高,等.大跨越钢管混凝土输电塔抗震性能分析[J].电力勘测设计,2018,25(增刊2):137
ZHU Ruiyuan, LI Xilai, LIAO Zonggao, et al. Seismic performance analysis of a long-span concrete filled steel-tube transmission tower[J]. Electric Power Survey & Design, 2018, 25(S2): 137. DOI: 10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2018.s2.025
- [2] 练其安,雷东,张大伟,等.钢管混凝土中型钢与混凝土黏结性能试验研究[J].钢结构,2018,33(9):49
LIAN Qi'an, LEI Dong, ZHANG Dawei, et al. Experimental research on bond property between profile steel and concrete in concrete filled steel tube[J]. Steel Construction, 2018, 33(9): 49. DOI: 10.13206/j.gjg201809009
- [3] 韩林海.钢管混凝土结构[M].北京:科学出版社,2016:34
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structure[M]. Beijing: Science Press, 2016: 34
- [4] FU Zhaoqing, GE Hanbin, JI Bohai, et al. Interface bond behavior between circular steel tube and lightweight aggregate concrete[J]. Advanced Steel Construction, 2018, 14(3): 424. DOI: 10.18057/IJASC.2018.14.3.7
- [5] ZHOU Xuhong, YAN Biao, LIU Jiepeng. Behavior of square tubed steel reinforced-concrete (SRC) columns under eccentric compression[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 91: 129. DOI: 10.1016/j.tws.2015.01.022
- [6] 赵卫平,雷永旺,王振兴,等.钢管混凝土中内配钢骨与混凝土黏结性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(8):121
ZHAO Weiping, LEI Yongwang, WANG Zhensheng, et al. Experimental study on bond performance between internal steel and concrete in concrete filled steel tube[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(8):121. DOI:10.11918/202002049
- [7] 康希良,赵鸿铁,薛建阳,等.钢管混凝土粘结滑移问题综述分析[J].西安建筑科技大学学报,2006,38(3):321
KANG Xiliang, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Summarized review of the bond-slip problems of concrete filled steel tubes (CFST)[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2006, 38(3): 321
- [8] 许开成,毕丽苹,陈梦成.钢管混凝土界面黏结应力-滑移本构关系试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(增刊1):410
XU Kaicheng, BI Liping, CHEN Mengcheng. Experimental study on bond stress-slip constitutive relationship for CFST[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S1):410. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.S1.062
- [9] 陈宗平,徐金俊,薛建阳,等.钢管再生混凝土黏结滑移推出试验及黏结强度计算[J].土木工程学报,2013,46(3):49
CHEN Zongping, XU Jinjun, XUE Jianyang, et al. Push-out test on the interface bond-slip behavior and calculation on bond strength between steel tube and recycled aggregate concrete in RACFST structures[J]. Journal of Civil Engineering, 2013, 46(3): 49. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2013.03.016
- [10] TAO Zhong, SONG Tianyi, UY B, et al. Bond behavior in concrete-filled steel tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 120: 81. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.12.030
- [11] YU Chen, FENG Ran, SHAO Yongbo, et al. Bond-slip behaviour

- of concrete-filled stainless steel circular hollow section tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 130: 248. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.12.012
- [12] 康希良,程耀芳,涂响,等. 钢管混凝土粘结-滑移性能试验研究及数值分析[J]. 工程力学,2010,27(9):103
KANG Xiliang, CHENG Yaofang, TU Yun, et al. Experimental study and numerical analysis of bond-slip performance for concrete filled steel tube[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 103
- [13] 王振,张宁. 钢管混凝土的界面黏结-滑移性能数值分析研究[J]. 中国公路学报,2018,38(1):192
WANG Zhen, ZHANG Ning. Numerical analysis on bond-slip behavior of concrete-filled steel tubes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018,38(1):192. DOI:10.14048/j. issn. 1671-2579. 2018. 01. 041
- [14] HWANG J Y, KWAK H G, KWON Y. A numerical model for considering the bond-slip effect in axially loaded circular concrete-filled tube columns [J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(12): 1933. DOI: 10.1177/1369433218759779
- [15] 赵卫平,雷永旺,尹鹏,等. 钢管混凝土界面黏结破坏的声发射特征及时空演化机制[J/OL]. [2020-11-26]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0052>
ZHAO Weiping, LEI Yongwang, YIN Peng, et al. Investigation on acoustic emission characteristics and time-space evolution mechanism of interfacial bond failure of concrete-filled steel tube [J/OL]. [2020-11-26]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0052>
- [16] 董家顺,王兴东,李殿杰,等. 基于改进 K-means 算法的钢管表面缺陷视觉检测方法[J]. 武汉科技大学学报,2020,43(6):440
DONG Jiashun, WANG Xingdong, LI Dianjie, et al. Visual inspection method for surface defects of steel tubes based on improved K-means algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2020, 43(6): 440. DOI: 10.3969/j. issn. 1674-3644. 2020. 06. 007
- [17] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: Chinese Architecture and Building Press, 2015
- [18] 赵卫平,朱彬荣. 高温后 HSC 粘结滑移基础参数测量与 3D 有限元数值模拟[J]. 工程力学,2017,34(4):180
ZHAO Weiping, ZHU Binrong. Basic parameters test and 3D modelling of bond in HSC after elevated temperatures [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(4): 180. DOI: 10.6052/j. issn. 1000-4750. 2015. 11. 0898
- [19] 赵卫平. 基于 ANSYS 接触分析的粘结-滑移数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(2):47
ZHAO Weiping. Bond-slip numerical simulation based on ANSYS contact analysis[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2): 47. DOI: 10.19815/j. jace. 2011. 02. 008
- [20] 中国电力企业联合会. 输电线路钢管塔用直缝焊管: T/CEC 136—2017[S]. 北京:中国电力出版社,2017
China Electricity Council (CEC). Longitudinal welding pipe for transmission line steel tubular tower: T/CEC 136—2017 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017
- [21] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007:281
WANG Xinmin. Numerical analysis of engineering structure on ANSYS[M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 281
- [22] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: Chinese Architecture and Building Press, 2017

(编辑 赵丽莹)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“镂空双层幕墙对高层建筑结构风响应的影响”,是浙江大学建筑工程学院谢霖明教授课题组提出的对现有建筑空气动力学优化方法的一个理想补充的原理示意图。为实现建筑物的节能低碳目标,镂空双层幕墙系统逐渐得到重视与普及,该系统由内玻璃幕墙与外镂空幕墙组成,且两者之间存在一定空隙,不但具有建筑美学功能,还能在一定程度上减小内玻璃幕墙风压。通过风洞试验方法对具有镂空双层幕墙系统的高层建筑抗风性能进行了详细的规律性研究,考察了镂空双层幕墙系统的覆盖面积与覆盖位置对抗风效率的影响,以及不同周边场地情况的影响。研究结果证实了镂空双层幕墙在抑制建筑横风向响应方面的有效性,特别是当镂空双层幕墙位于建筑物上部且覆盖至少 1/6 总高度时有效性更为显著。同时发现镂空双层幕墙不仅可以用于降低极端风下的风振加速度与结构设计风荷载,而且可用于改善建筑物在常遇风条件下的居住舒适度。此外,不同场地条件下镂空双层幕墙在减少横风向响应方面的效果基本类似。

(图文提供:杨肖悦,秦玮峰,柯延宇,谢霖明. 浙江大学建筑工程学院)