

基于 ABAQUS 的薄壁方钢管混凝土柱力学性能研究

胡佳杰, 陈志华

(天津大学建筑工程学院, 天津 312000)

[摘要] 基于有限元分析程序 ABAQUS, 对薄壁方钢管混凝土轴压柱力学性能进行非线性有限元分析。采用混凝土塑性损伤模型, 讨论了薄壁方钢管混凝土短柱三维非线性分析的建模方法和模型参数取值, 并研究了其破坏特征、受力性能、应力和应变特点等, 并与试验结果以及理论结果对比, 验证了有限元模拟结果的可靠性。

[关键词] ABAQUS; 混凝土塑性损伤模型; 带肋方钢管混凝土; 轴压

中图分类号: TU398 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2015)S2-0456-05

Study on mechanical behavior of concrete-filled thin-walled steel tubes columns based on ABAQUS

Hu Jiajie, Chen Zhihua

(Construction Engineering College, Tianjin University, Tianjin 312000, China)

Abstract: Based on finite element software ABAQUS, the performance of concrete-filled thin-walled steel tubes (CFST) columns on the axial compression was analyzed. By using plastic model of concrete damage in ABAQUS, the modeling method and parameter about 3D nonlinear analysis of CFST were discussed; the failure mode and the stress-strain characteristics were studied. Compared with the experimental and theoretical results, the reliability of the finite element simulation results was proved.

Keywords: ABAQUS; plastic model of concrete damage; SCFTST; axial compression

0 引言

方钢管混凝土具有稳定性能好、承载能力高、防火性能优良等特点, 被广泛应用在大型场馆、桥梁以及高层和超高层建筑中。与圆钢管混凝土相比, 方钢管混凝土还具有节点形式简单、施工方便、建筑布局灵活等优势。在现代的钢管混凝土工程中, 经常采用管壁较薄的钢管混凝土, 相比较传统工程中使用的厚壁钢管混凝土, 其可以减少钢材用量、简化施工安装工艺、缩短工期, 达到降低造价的目的。但是方钢管混凝土对宽厚比有着严格的限制, 若超过一定的限值, 钢管容易屈曲失稳, 造成管壁向外局部鼓曲, 无法约束核心混凝土, 进而降低构件的承载能力。

国内外的一些专家学者研究发现, 参照钢结构中处理钢管局部屈曲的方法, 在钢管混凝土管壁内设置沿纵向的加劲肋可提高构件的稳定性以及承载力。一方面加劲肋具有很强的抗弯刚度, 可作为支撑点约束板件的面外变形。另一方面可以增大板件发生局部屈曲时的临界应力。板件屈曲模式如图1所示。

本文主要利用 ABAQUS 有限元软件对设肋和不设肋薄壁方形钢管混凝土结构的变形和受力性能进行研究, 通过建立模型对结构构件从受荷开始进行参数化分析直至其破坏。并利用其强大的后处理功能获得结构的变形图、荷载-位移曲线、极限承载力等, 并将得到的模拟结果与试验、理论结果进行比较, 验

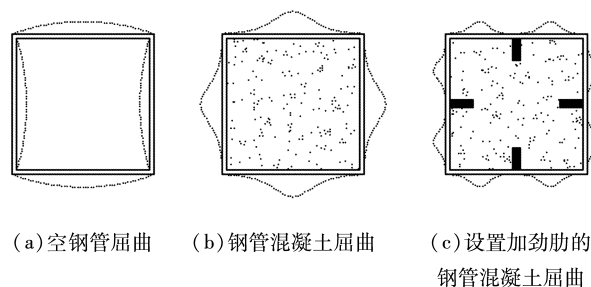


图1 板件屈曲模式

证 ABAQUS 有限元模型的可靠度以及参数取值的正确性。

1 ABAQUS 有限元分析模型的建立

1.1 材料本构模型的选择

应力-应变关系是有限元建模分析中必不可少的依据, 它可以反映材料的物理力学关系。在一个结构构件中, 不同的应力-应变关系就会得到不同的承载力和变形。因此为了建立钢管混凝土构件的受力模型, 分析其力学性能和承载力, 必须首先确定合适这种结构形式的钢管和混凝土的应力-应变关系模型。这是 ABAQUS 模拟中最重要的一步。

1.1.1 钢材的本构模型

规定钢材的比例极限、屈服极限和抗拉极限分别用符号 f_p 、 f_y 和 f_u 表示。当钢材应力超过比例极限就

会表现出非线性。本文同时考虑钢材的非线性和塑性发展,应用如图2所示的应力-应变关系曲线建立理论模型。

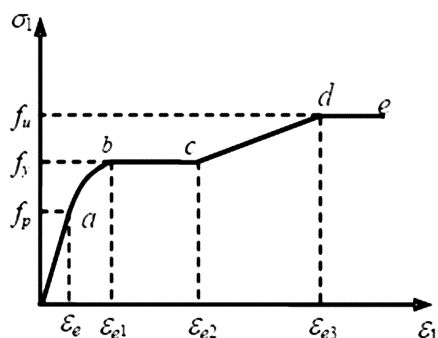


图2 钢材应力-应变曲线

1.1.2 混凝土的本构模型

混凝土在工程中应用很广泛,其破坏机理为:混凝土受到外力,其内部产生应力,在内部的天然微裂缝顶部形成应力集中,导致微裂缝的进一步延伸、贯通、扩展,最后在表面形成几条肉眼可见的裂缝。随着这些裂缝的进一步扩展和贯通,混凝土试件逐渐丧失承载力而发生破坏。其工作机理本质上是由后期养护过程中产生的天然微裂缝与水泥、粗骨料和砂浆等材料的不均匀性共同决定的。这也造成了混凝土材料分析时的复杂性。在钢管混凝土中,外包钢管约束核心混凝土,使混凝土从单向受力变为三向受力,从而形成套箍效应。由于这种套箍效应使核心混凝土承载力提高,但工作性能进一步复杂化,分析难度加大。

国内外许多专家学者对混凝土的强度和变形进行了研究,提出了很多强度理论,其中韩林海^[2]通过大量钢管混凝土轴压算例分析,提出了适用 ABAQUS 有限元分析的核心混凝土应力-应变关系模型如图3所示,且具有较好的通用性。

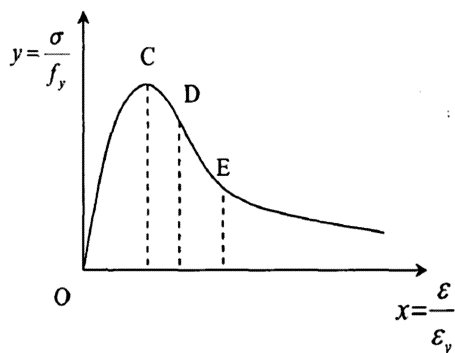
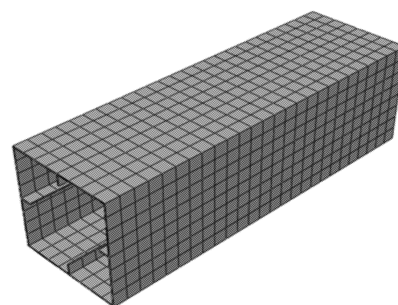


图3 韩林海^[2]建议的混凝土应力应变曲线

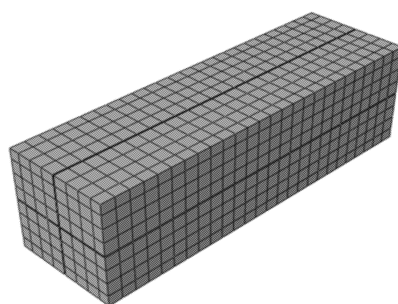
1.2 有限元模型的建立

本文采用 ABAQUS 有限元分析软件对四组不设肋和七组设肋方钢管混凝土柱采用位移协调分离式

建模法进行建模。这样便于整体受力分析,且模型易于收敛。在大量的试验情况下,钢管混凝土柱在轴压过程中钢管与混凝土不产生相对滑移,即两种材料变形协调。这与模型受力情况对应,因此采用该方法进行建模具备可行性。建立 ABAQUS 计算模型见图4。



(a) 带肋钢管模型



(b) 混凝土模型

图4 带肋钢管混凝土典型 ABAQUS 模型

1.2.1 接触面处理

在 ABAQUS 中,规定钢管与混凝土的截面模型由切线方向的粘结滑移和法线方向的接触构成。在界面的切线方向采用摩尔库伦模型,摩擦系数取 0.3。法线方向的接触定义为“硬”接触,即规定接触面不会相互穿透且分离时没有相互作用。由于在实验过程中加载板几乎不会产生变形,所以在进行有限元分析模拟时将其视为刚体,柱加载板与混凝土顶也采用“硬”接触。

1.2.2 分析步的确定

在初始分析步之后建立一个预加荷载步,对试件施加一个沿轴向 1kN 的力,之后再设置加载步,以保证钢管、加劲肋与混凝土接触,使模型易于收敛。在 ABAQUS 的 step 里有 initial increment、minimum increment、maximum increment、maximum number of increment 四个量。经过反复试验,在进行钢管混凝土柱建模分析时,由于混凝土和钢材的材料非线性,如果把 initial 输入值设置为 0.01 则能有效减少循环计算的次数,而 number 一般要设置较大值,以便于收敛。由于 ABAQUS 计算精度约为 10^{-5} ,当 increment 小于这个值时结果意义不大,所以 minimum increment 并不是设置越小越好。本文建模时参数取值如图4

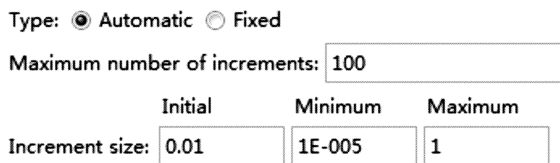


图4 模型参数取值

所示。

1.2.3 边界条件与加载方式

在建模中,钢管混凝土柱一端固定,在另一端施加沿轴向的荷载。采用位移加载方式,在加载板表面施加竖向位移荷载。

1.2.4 单元选取

为了使有限元的模拟结果与实验研究相接近,本文均对混凝土、钢管和加载板选择八节点减缩分格式的三维实体单元(C3D8R),该单元可应对受力变形中产生的较大网格屈曲,同时适用于接触分析。

1.2.5 单元网格划分

在 ABAQUS 中,模型网格的划分对计算结果具有重要的影响。考虑到若模型网格划分太过精细,网格数量过多,则将花费大量计算机资源,浪费时间同时也不易于收敛。而如果模型网格划分太粗糙,计算结果可能存在错误或误差太大。因此本文在模拟 11 个试件时,结合网格试验确定网格密度。对钢管网格划分采用扫掠网格划分技术,网格尺寸为 20mm 的六面体单元;而对混凝土,根据其力学特性和受力时的变形情况,采用扫掠网格划分技术,网格尺寸为 15mm 的六面体单元。

2 模拟结果数值分析

2.1 算例模型

在以上分析的基础上,参照金周^[6]的试验数据(表1),对4组不设肋和7组设肋钢管混凝土柱进行轴压非线性有限元分析,采用与试验相同的几何尺寸与材料参数,试件情况如表2所示。由表可知:

(1)试件 UCFT1 比试件 SCFT1-1(其他条件均相同)的极限承载力大,同样可见试件 UCFT2 比 SCFT2-1 的极限承载力大。说明设置加劲肋后的试件极限承载力均有一定程度的提高。

(2)在其他条件相同的情况下,对已经加劲后的试件,肋刚度的提高对试件极限承载力的影响并不明显。如试件 SCFT1-2 和试件 SCFT1-3(宽厚比为 80),试件 SCFT2-3 和试件 SCFT2-4(宽厚比为 100),虽然刚度提高很多,但承载力提高并不明显。表明加劲肋刚度对钢管混凝土承载力的影响在一个区间范围内。超过某个刚度界限值,增大刚度并不能提高试件的承载力。

(3)模型计算结果与试验结果进行对比分析得出柱的极限荷载误差在可控范围以内。误差产生的原因主要是有:1)实际试件的钢管中存在初始应力以及初始缺陷(材料缺陷和几何缺陷),混凝土中存在天然的微裂缝。这些初始应力以及初始缺陷都是 ABAQUS 不能精确考虑的。如钢管在冷弯过程中钢板的强度提高,焊接制作过程中残余应力的存在,这些因素都无法精确测量,也无法模拟,因此产生误差在所难免。2)试验^[6]中的加载方式与模拟时有一定区别。试验时可能导致核心混凝土局部受压,造成承载力降低。

本文的模拟结果误差最大仅为 13.7%,表明采用混凝土损伤塑性模型,结合位移协调分离式建模法建立 ABAQUS 有限元模型,可对设肋和不设肋钢管混凝土柱进行较为准确的计算分析。

轴压试件截面明细

表 1

试件名称	L/mm	B/mm	t/mm	$b_s \times t_s/\text{mm} \times \text{mm}$	I_s/mm^4
UCFT1	519	160	1.98	—	—
SCFT1-1	519	160	1.98	16×1.98	676
SCFT1-2	519	160	1.90	16×1.90	649
SCFT1-3	519	160	1.90	24×1.90	2189
UCFT2	636	200	1.98	—	—
SCFT2-1	636	200	1.98	20×1.98	1320
SCFT2-2	636	200	1.98	29×1.98	4024
SCFT2-3	636	200	1.90	20×1.90	1267
SCFT2-4	636	200	1.90	31×1.90	4717
UCFT3	519	160	1.98	—	—
UCFT4	636	200	1.98	—	—

注: L 为试件长度; B 为钢管截面外部尺寸; t 为板件厚度; b_s 为加劲肋截面宽度; t_s 为肋板厚度; I_s 为肋截面抗弯刚度。

薄壁钢管混凝土轴压试件

表 2

试件名称	f_y/MPa	f_c/MPa	N_1/kN	N_2/kN	N_1/N_2
UCFT1	318.5	37.3	1124	1156	0.972318
SCFT1-1	318.5	37.3	1273	1304	0.976227
SCFT1-2	140.2	28.6	957	967	0.989659
SCFT1-3	140.2	28.6	1003	1037	0.967213
UCFT2	318.5	37.3	1475	1636	0.901589
SCFT2-1	318.5	37.3	1471	1705	0.862757
SCFT2-2	318.5	37.3	1518	1730	0.877457
SCFT2-3	140.2	28.6	1205	1310	0.919847
SCFT2-4	140.2	28.6	1233	1330	0.927067
UCFT3	140.2	28.6	—	811	—
UCFT4	140.2	28.6	—	1289	—

注: f_y 为钢管屈服强度; f_c 为混凝土轴心抗压强度; N_1 为实测极限承载力; N_2 为有限元计算的极限承载力。

2.2 模型变形图分析

试件典型的破坏形态如图5所示,荷载-平均纵向应变($N-\varepsilon$)关系曲线如图6所示。从图5可以看出,模拟柱破坏形态主要为腰鼓形压皱破坏,在试件高度方向形成一个波形。试件压皱后,在鼓出部位,近似为一个椭圆形,该结果与试验结果一致。

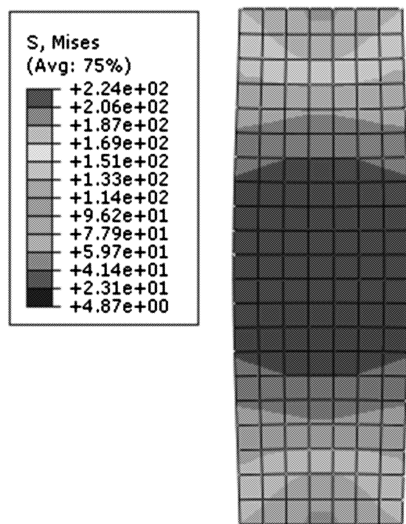


图5 试件 SCFT1-1 破坏形态对比 MPa

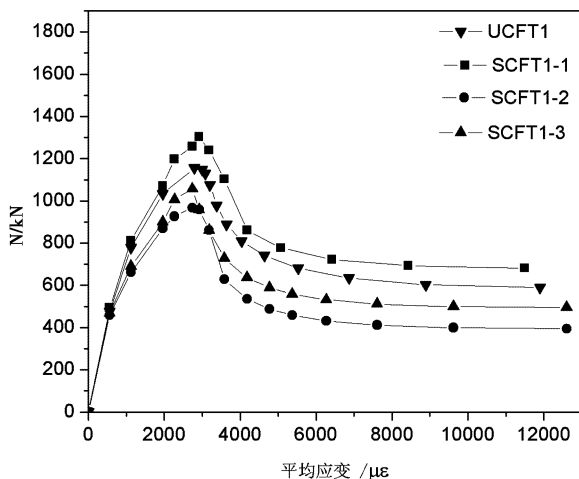
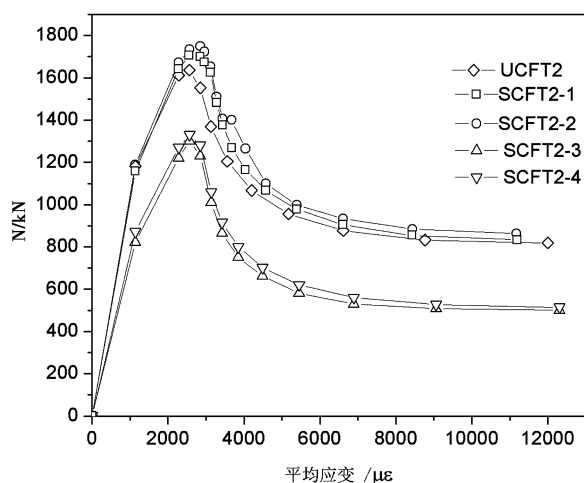


图6 荷载-平均纵向应变($N-\varepsilon$)关系曲线

2.4 未带肋构件轴压承载力计算方法验证

目前许多国家如美国、英国、日本等都拥有自己的规范规程,对方、矩形钢管混凝土试件承载力的验算方法进行了规定。随着矩形钢管土理论的不完善和工程实践的大力推广,我国在相应规程中也提出方、矩形钢管混凝土试件承载力的计算方法。如我国工程建设标准化协会标准《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159:2004)^[12](简称 CECS 159:2004)和福建省工程建设标准《钢管混凝土结构技术规程》(DBJ 13-51—2003)^[13](简称 DBJ 13-51—2003)。本文基于 ABAQUS 的模拟结果,着重对上述两本规范提出的理论公式进行验证。

(1) CECS 159:2004

该规程规定承载力计算公式如下:

$$N_{cecs} = A_s f_y + A_c f_c \quad (1)$$

式中: A_s 为钢管的截面积; A_c 为核心混凝土的截面积; f_y 为钢管的屈服强度; f_c 为混凝土的轴心抗压强度。

(2) DBJ13-51—2003

在该规范中,规定采用约束效应系数来描述钢管与混凝土二者之间的相互作用,其定义为:

$$\xi = \frac{A_s f_s}{A_c f_c} \quad (2)$$

该规程规定,在钢管混凝土结构中,钢管与混凝土形成一种组合材料,基于组合截面计算其承载能力,其组合截面的轴压强度可表示为:

$$N_{DBJ} = (A_s + A_c) f_{scy} \quad (3)$$

f_{scy} 为方形或矩形钢管混凝土的组合轴压强度,计算公式如下:

$$f_{scy} = (1.18 + 0.85\xi) f_c \quad (4)$$

利用上述公式对表1中的试件进行了计算,所得的结果与有限元模拟值比较见表3。

理论公式结果与 ABAQUS 模拟值对比 表3

试件名称	$A_{s,t}$ /mm ²	A_c /mm ²	ξ	N_{DBJ} /kN	N_{cecs} /kN	N_2 /kN	N_{DBJ}/N_2	N_{cecs}/N_2
UCFT1	1264	24336	0.327	1324	1205	1156	1.145	1.042
UCFT2	1584	38416	0.260	2007	1805	1650	1.217	1.094
UCFT3	1264	24336	0.255	972	873	811	1.198	1.077
UCFT4	1584	38416	0.202	1485	1321	1289	1.152	1.025

注: N_{cecs} 为应用 CECS 159:2004 计算的承载力; N_{DBJ} 为应用 DBJ 13-51—2003 计算的承载力; N_2 为有限元计算的承载力。

从两个规范的计算公式可知 CECS 159:2004 是分别计算钢管和混凝土单独作用时的承载力,然后将两者相加,其中并未考虑钢管对混凝土的约束作用,显然计算结果较实际承载能力偏小。而 DBJ 13-51—

2003 引入约束效应系数(ξ),用 ξ 来描述钢管与混凝土二者之间的相互作用,并定量考虑由于钢管的约束使核心混凝土轴压强度提高的程度。然而由表中数据结果可以看出 CECS 159:2004 相较 DBJ 13-51—2003 误差更小些,与模拟结果吻合更好。其产生原因主要是:1)实际构件在生产、加工中总会产生尺寸方面的误差,且材料中存在天然的缺陷和残余应力,会降低构件的承载力。2)在轴向压力作用下,薄壁方钢管混凝土柱的钢管壁容易屈曲失稳,造成管壁向外局部鼓曲,无法约束核心混凝土,进而降低构件的承载能力。因此在实际工程中应用 CECS 159:2004 计算构件承载力更加准确。

3 结 论

(1)用有限元分析软件 ABAQUS 对已有试验进行非线性分析,并将分析结果和试验结果进行比较,验证了用有限元分析的可行性。证明了模型中建立的接触条件、边界条件、材料属性参数等设置的正确性,以及混凝土本构关系、钢材本构关系选择的合理性。

(2)通过分析本文的模拟结果,可见与无肋试件相比,加肋试件能有效防止薄壁钢管屈曲,且带肋试件受力在达到极限时,钢管应力有明显的提高。结论与实际相符,可见运用 ABAQUS 有限元计算方法对带肋钢管混凝土轴压短柱进行力学分析具备可行性,可为带肋钢管混凝土的力学分析提供参考。

(3)将 ABAQUS 计算的构件承载力与相关规范公式的计算结果进行对比分析,得出在实际工程中应用规程《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159:2004)计算承载力更加安全可行。

参 考 文 献

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论:理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [3] 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.
- [4] 徐兵,刘永健,李中青,等. 带肋方钢管混凝土轴压短柱承载力有限元分析研究[J]. 湘潭大学自然科学学报,2012,34(4).
- [5] 王阳杰. 基于 ABAQUS 的钢管混凝土柱有限元分析[J]. 福建建设科技,2014(5).
- [6] 金周. 薄壁钢管混凝土短柱基本力学性能研究[D]. 泉州:华侨大学,2008.
- [7] GB 50018—2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范 2[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [8] 张耀春,王秋萍,毛小勇,等. 薄壁钢管混凝土短柱轴压力学性能试验研究[J]. 建筑结构,2005,35(1):22-27.
- [9] ABAQUS theory manual and user manuals, Version 6.5 [Z]. Providence, R. I.: ABAQUS Inc., 2004.
- [10] WRGHT H D. Local stability of filled and encased steel sections[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(10):1182-1188.
- [11] BRAIN UY. Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling[J]. Journal of Strcutural Engineering, 2000,126(3):341-352.
- [12] CECS 159: 2004 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2004.
- [13] DBJ 13-51—2003 钢管混凝土结构技术规程[S]. 福州,2003.
- [14] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [15] 黄宏,张安哥,李毅,等. 带肋方钢管混凝土轴压短柱试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报,2011,32(2):75-82.