

钢筋混凝土悬臂梁全过程力学有限元分析

陆新硕 杨 印 余林峰 姚小梅 李娅雪

上海工程技术大学, 上海 201620

摘 要: 本文基于 Abaqus 有限元分析软件, 针对截面尺寸为 $300 \times 300\text{mm}$ 、跨度 2000mm 的钢筋混凝土悬臂梁开展全过程力学仿真分析, 旨在验证模型有效性并探索结构力学响应特征。本研究通过详细的建模流程展示了 Abaqus 在钢筋混凝土结构分析中的应用潜力, 为同类工程问题提供了可复用的仿真框架, 对推动有限元技术在土木工程中的普及具有参考意义。

关键词: Abaqus; 钢筋混凝土悬臂梁; 有限元技术

1 Abaqus 软件介绍, 运用价值

Abaqus 是一款功能强大的通用有限元分析软件, 广泛应用于工程、科学研究和产品开发领域。有很大的运用价值。

(1) 缩短研发周期, 通过虚拟仿真替代部分物理试验, 减少原型制作次数。例如, 汽车厂商利用 Abaqus 优化碰撞性能, 可减少 50% 的实车碰撞试验。

(2) 降低研发成本, 避免设计缺陷导致的返工成本。例如: 航空发动机叶片的疲劳分析可提前发现潜在裂纹, 降低维修成本。

(3) 提升产品性能与可靠性, 预测产品在复杂工况下的行为 (如高温、高压、振动)。例如: 电子产品的散热分析可优化布局, 提高可靠性。

(4) 支持创新设计, 分析新型材料 (如复合材料、超材料) 的性能。例如: 可穿戴设备的柔性电路力学分析, 推动可折叠屏幕技术发展^[1]。

但是其操作十分复杂, 本文旨在详细描述钢筋混凝土悬臂梁的全过程力学分析, 指导人们初步使用并熟悉 Abaqus 软件。

2 模型参数概述

本模型采用钢筋混凝土悬臂梁, 梁的截面面积为 $300 \times 300 (\text{mm})$, 跨度 $2000 (\text{mm})$ 。边界条件为, 一端自由, 一端固定。分别施加轴向载荷: $270\text{KN} (c)$ 的压力和位移荷载 200mm 。

主筋的截面面积为 254.47mm^2 。有八根, 固定端主筋点坐标分别为图 1:

X	Y	Z
62.5	62.5	2000
62.5	150	2000
62.5	237.5	2000
150	237.5	2000
237.5	237.5	2000
237.5	150	2000
237.5	62.5	2000
150	62.5	2000

图 1 固定端主筋的点坐标

箍筋的面积为: $78.54\text{mm}^2 (240 \times 240\text{mm})$, 有 11 个, 第一个箍筋的点坐标: $(30, 30, 1950)$ 。

材料方面, 钢筋的密度为 $7.8\text{E}-6\text{kg/mm}^3$, 弹性中的杨氏模量为 $200000 (\text{mpa})$, 泊松比为 0.3, 塑性中的屈服应力分别为 280, 370, 塑性应变分别为 0, 0.1。混凝土的密度为 $2.4\text{E}-6\text{kg/mm}^3$, 弹性中的杨氏模量为 $17585 (\text{MPa})$, 泊松比为 0.17。在混凝土损伤塑性中, 膨胀角取 30.5, 偏心率取 0.1, $f_b(\)/f_c(\)$ 取 1.16, K 值取 0.666, 粘性参数取 0.001。受压行为和拉伸行为分别取以下图 2 excel 表格中的数据。

	A	B	C	D	E	F	G
1	混凝土损伤塑性受压行为			混凝土损伤塑性拉伸行为			
2	5.232631726	0		1.16	0		
3	6.277664319	8.00E-05		1.08	0.000036		
4	7.211482486	0.00011756		0.975	0.000140293		
5	8.037816402	0.000162279		0.905	0.000244566		
6	8.76131374	0.000213877		0.84	0.000348534		
7	9.387988705	0.000271954		0.78	0.000452218		
8	9.924736064	0.000336046		0.724	0.000556568		
9	10.37892424	0.000405661		0.672	0.000656814		
10	10.75807052	0.000480297		0.624	0.000761762		
11	11.0695938	0.000569456		0.58	0.000864499		
12	11.32063606	0.000642662		0.538	0.00096704		
13	11.51794157	0.000729462		0.5	0.001069399		
14	11.66778274	0.000819438		0.464	0.00117159		
15	11.77592203	0.000912203		0.431	0.001273623		
16	11.84760087	0.001007408		0.4	0.001375511		
17	11.88754784	0.001104736					
18	11.9	0.001203903					
19	11.741305	0.001314519					
20	11.58261	0.001425136					
21	11.423915	0.001535752					
22	11.26522	0.001646369					
23	11.106525	0.001756985					
24	10.94783	0.001867602					
25	10.789135	0.001978218					
26	10.63044	0.002088835					
27	10.471745	0.002199451					
28	10.31305	0.002310068					
29	10.154355	0.002420684					
30	9.99566	0.002531301					
31	9.836965	0.002641918					
32	9.67827	0.002752534					
33	9.519575	0.002863151					
34	9.36088	0.002973767					
35	9.202185	0.003084384					
36	9.04349	0.003195					

图 2 混凝土的受压和拉伸行为

3 Abaqus 详细分析过程

在建立模型前,必须先确定量纲系统。ABAQUS 没有固定的量纲系统,一个项目所有的输入数据只能用同一个量纲系统,下表为常用的量纲系统,我们通常采用 mm, N, t, Mpa 对应的量纲^[2]。

3.1 部件模块

本节的任务是用部件模块来生成分析所需的部件。部件是模型中每一部分的几何形体,它们是 ABAQUS/CAE 模型的基本构造块。

首选的是在 ABAQUS/CAE 环境中直接生成部件,也可以由其它软件生成几何体或有限元网格,再导入作为部件。在 abaqus 中生成时,首先点击“创建部件”,命名为“Concrete”表示混凝土,模型空间选 3D,选择类型为可变性,基本特征中,形状为实体,类型为拉伸。由于悬臂梁的截面面积为 300×300 ,所以尺寸输入 600。在绘图截面,选矩形,一端点在原点,另一端输入坐标(300, 300),画出悬臂梁的截面,再按鼠标中键表示确认,深度输入 2000,说明把截面拉伸 2000,这样悬臂梁的混凝土实体就建好了。

接下来用相同的思路建钢筋部件,不过在基本特征中,形状选线,类型为平面。生成一个长度为 2000 的“bar”线条,表示主筋。生成一个边长为 240×240 的矩形线条,命名为“Stirrup”,表示箍筋^[3]。

3.2 属性模块

接下来要定义钢筋和混凝土的材料属性,并且给建好的部件赋予上相应的属性。这里需要创建两个材料,分别为

钢和混凝土。首先点击属性中的创建材料,命名为“Steel”,分别选用通用中的密度,力学中的弹性和塑性,然后根据之前介绍的参数分别输入。然后再创建一个材料,命名为“Concrete”,选用通用中的密度,力学中的弹性和塑性中的混凝土损伤塑性,输入相应的值即可。

下一步是创建截面并且将截面指派到相应的部件处。创建三个截面,分别为“Section-Concrete, Section-Bar, Section-Stirrup”,其中 Section-Concrete 选择实体,均质,材料选择 Concrete,其他保持默认设置。Section-Bar 类别选梁,类型选桁梁,材料选 Steel,截面面积为 254.47。Section-Stirrup 同样类别选梁,类型选桁梁,材料选 Steel,但截面面积为 78.54。^[4]

定义完了截面,接下来就是将相应的截面指派到对应的部件中去。点击“指派截面”,并取消掉下面“创建集合”的勾选。切换到每一个部件,选中后分别指派相应的截面即可。

3.3 装配模块

每一个部件都是面向它自己的坐标系的,是互相独立的。用户需要在装配模块中定义整个装配件的几何形体。

整个过程中可以对建立的各个部件进行移动,旋转,阵列复制,添加几何约束等操作,将多个部件组装成一个整体。

首先点击“创建实例”,选中 Concrete,点击确定,此部件就出现到装配里了。为了将主钢筋按照规定插入到合适的位置,要将相应的点给标出来。点击软件上方的“工具”,选中基准,用输入坐标的形式创建基准点。完成后效果如下图 3:

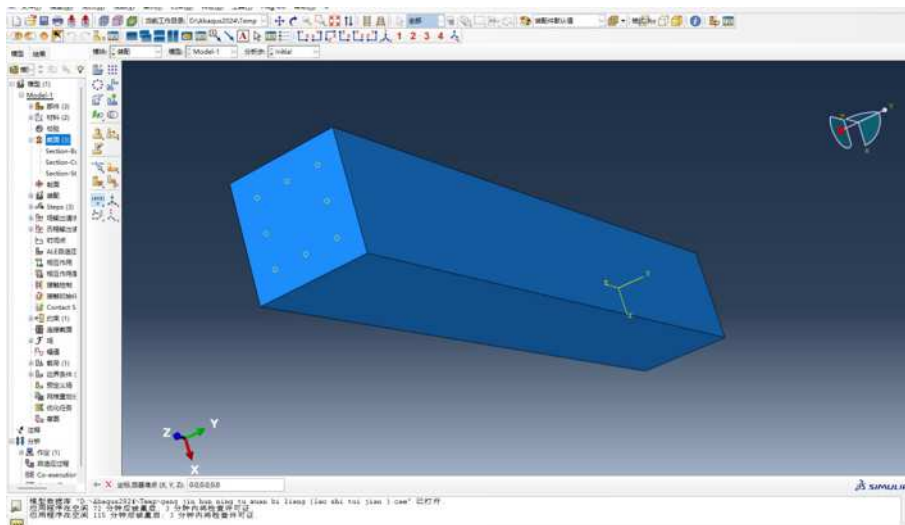


图 3 实例模型

创建完基准点之后, 再将“Bar”部件插入装配中, 刚插入时会发现, Bar 部件垂直与混凝土的长边, 点击旋转实例, 选中 Bar 部件, 然后选中 y 轴, 让 Bar 部件绕其旋转 90° , 便使 Bar 部件平行与混凝土长边了, 再点击平移实例, 选中 Bar 部件的一点, 将其平移到已经标注好的基准点上。为了能看到平移好的 Bar 部件, 可以点击软件上方切换全局透明开关, 将 Concrete 部件的透明度降低。重复上述操作, 将八条主筋装配到指定的基准点。

继续点击“创建实例”, 将箍筋部件插入装配中, 点击平移实例, 选中箍筋在坐标上的点, 输入坐标 (30, 30, 1950), 将其平移到合适的位置。点击线性阵列, 因为箍筋在混凝土内部, 不好选中, 可以先全选, 然后按住 Ctrl, 点击删除其他的部件。最后选后箍筋后, 调整方向, 使其沿着主筋的方向阵列 11 个, 每个的偏移量为 180° 。

3.4 分析步模块

对模型施加荷载、边界条件或定义模型的接触问题之前, 必须定义分析步, 然后才可以指定在哪一步施加荷载, 在哪一步施加边界条件, 哪一步去定义相互关联。

ABAQUS 的各种荷载要分别加载在不同的分析步中, 比如像竖向荷载、偏转角度、水平荷载要分别建立三个分析步。常用的分析类型有通用分析 (General) 和线性摄动分析 (Linear perturbation) 两种。

在初始分析步的基础上创建一个分析步再在其基础上创建另一个分析步, 分别为 Step-1 和 Step-2。程序类型选静力通用, 打开几何非线性, 增量步大小初始设为 0.01, 最大设为 0.1。其他使用默认设置。

点击软件上方的工具, 选中集, 创建名为 RF2, 类型为几何的集, 并将其指派给带有基准点的面上。继续创建一个名为 U2, 类型为结点的集, 将其指派给 y 轴与 x 轴上分别与原点相对的点两个点, 选择时, 按住 shift 可以多选。点击创建两个分析步为 Step-2 的历程输出, 一个名为 RF2, 作用域选集, RF2。输出变量选下面的作用力中的 RF, 反作用力和力矩中的 RF2。另一个名为 U2, 作用域选集, U2。输出变量选位移 / 速度 / 加速度里的 U / 平移和转动下的 U2。其他使用默认设置^[6]。

3.5 相互作用模块

创建接触对是比较麻烦和耗时的, 这里面要注意下面几个问题: 主面和从面的选择, 滑动模式的选择, 离散方法

的选择等, 其中主从面的选择要特别注意。

点击创建约束, 选择类型为内置区域。首先选择内置区域, 选中内部的钢筋骨架, 点击确认, 主区域的选择方法选“整个区域”, 然后选择外面的混凝土为主区域。其他用默认设置。完成后点确认即可。

3.6 载荷模块

在载荷模块中施加边界条件和荷载。施加边界条件和荷载也依赖于所建立的分析步。这里我们将悬臂梁的一端固定, 另一端分别施加横向荷载和位移荷载。点击创建边界条件 BC-1, 分析步选初始分析步, 类别选力学, 类型选位移 / 转角。点击确认, 选中含有基准点的面, 将坐标系中的 U1,U2,U3,UR1,UR2,UR3 全部选中, 表示将悬臂梁的这一端给固定。点击创建荷载, 分析步选 Step-1, 类别选力学, 类型选压强。接着选中与基准点面相对的另一面, 因为施加的力为 270KN, 截面面积为 300×300 , 所以经计算得压强为 3, 其他保持默认设置, 点击确定。说明在该面上施加了一个大小为 270KN 的力。继续点击创建边界条件, 分析步选 Step-2, 类别选力学, 类型选位移 / 转角, 选中基准点面相对的另一面, 在 U2 方向上输入 -200, 其他保持默认。说明在该面的 U2 方向上施加了 -200 的位移荷载^[7]。

3.7 网格模块

由于装配好的部件比较复杂, 所以划分网格时的对象选择部件, 即对部件进行网格的划分。划分网格前, 首先要指定各个部件的网格单元类型。尤其是 Bar 和 Stirrup 部件, 要先点击软件上面的网格选中单元类型, 在族里面找到桁梁, 其他保持默认。对于 Concrete 部件, 则是不用特别指定单元类型, 因为默认为三维应力。对于线条部件点击为边布种, 对于实体部件则种子部件。点击在三个部件的近似全局尺寸统一取 40, 尺寸控制依据预期模型精度和整体尺寸而定。这里可以做很多优化, 划分网格通常可以在自己关注的地方精度高些, 不关注的地方划分粗略些, 提高计算速度。最后在每个部件分别点击“为部件划分网格”即可自动划分完成^[8]。

需要注意的是实体之前被定义为 dependent (非独立) 时, 是无法被划分网格的, 另考虑到后期的复制操作, 建议在装配完, 及时为整个装配件划分网格。

3.8 作业模块

当前面的所有设置完成以后就可以提交分析, 只需要

选择分析类别(完全分析,重启动分析),提交分析作业即可。这里选择完全分析,其他保持默认选择不变。在作业管理器里点击提交,计算机就开始计算了,期间可以点击监控查看步骤或者出现的错误。提交完成后点击结果^[9]。

输出结果后,您可依据个人需求与偏好,从多样化的分析图形中择其适宜者,以达成更精准且直观的数据剖析,满足个性化需求。

4 结果显示与图像的调用

输出结果后在软件上方场输出对话框里选选择 RF 和 RF2,即可看见在设置的 RF2 集上所产生的反作用力和力矩。切换不同的物理量可以查看不同的结果。

那该如何显示出里面钢筋笼的变化呢?首先点击软件上方的创建显示组,在“项”中选择部件实例,选中 CONCRETE-1,再点击下面的删除按钮,就可显示出里面

的钢筋骨架了。但此事时线,钢筋是没有截面面积的。点击软件上方的“视图”,选择 ODB 显示选项,打开渲染剖面,就可以看到有截面面积的钢筋骨架了^[10]。

接下来要绘制该梁的荷载-位移曲线,点击部件左栏创建 xy 数据,选择 ODB 立场变量输出,选中以 RF2 结尾的输出变量,点击另存为,命名 RF2,保存操作选择 sum (XY,XY,...),取消勾选绘制图像 on OK。再选中以 U2 结尾的输出变量,点击另存为,命名 U2,保存操作选 avg (XY,XY,...)。关闭后再次点击创建 xy 数据,选择操作 XY 数据,在运操作符中选中 combine (x, x),分别双击刚才保存的 U2 和 RF2,在 U2 前面输入一个“-”号,另存为 Load vs Disp 即荷载 vs 位移。最后选中刚刚创建的 Load vs Disp,点绘制表达式,就能生成图 4 荷载-位移曲线了^[11]。

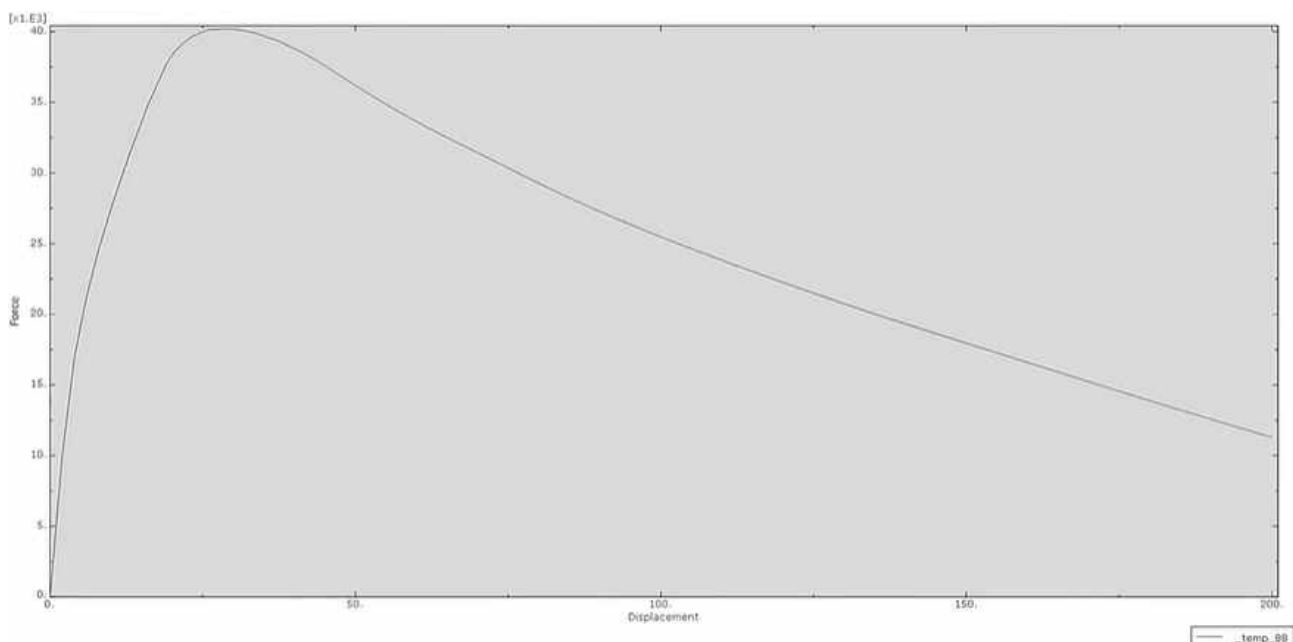


图 4 荷载-位移曲线

5 结论

在模型有效性方面,通过 Abaqus 建立的钢筋混凝土悬臂梁有限元模型,可模拟其在轴向压力(270KN)和位移荷载(200mm)作用下的力学响应,包括应力分布、变形过程及钢筋与混凝土的相互作用。对于关键响应特征,荷载-位移曲线可反映结构从弹性阶段到塑性阶段的全过程行为,揭示悬臂梁的刚度变化和承载能力。

钢筋与混凝土通过“内置区域”约束实现协同变形,

验证了两者的粘结性能对结构性能的影响。对于软件应用价值, Abaqus 的非线性分析能力(如混凝土损伤塑性模型、接触算法)可有效模拟复杂结构的力学行为,为钢筋混凝土构件设计提供数据支撑,减少物理试验成本^[12]。

后续还需要继续优化,可通过调整网格密度、材料参数或加载方式进一步优化仿真精度,或扩展至其他类型结构(如带裂缝构件)的分析。

参考文献:

- [1] 董琴琴. 基于 ABAQUS 下悬臂梁的静力学分析及拓扑优化[J]. 四川职业技术学院学报, 2022, 32(04): 145-148.
- [2] 王树国, 李立君, 廖凯, 等. 基于 ABAQUS 的平沙系统悬臂梁结构拓扑优化[J]. 机械强度, 2022, 44(02): 362-368.
- [3] 李荣荣, 朱双凯. 基于 ABAQUS 的钢筋混凝土悬臂梁挠度分析[J]. 河南科技, 2018, (07): 111-113.
- [4] 马尧. 基于 ABAQUS 的压电悬臂梁有限元仿真分析[J]. 吉林化工学院学报, 2014, 31(07): 49-52.
- [5] 黄辉, 陈韦, 彭杰波, 等. 基于 ABAQUS 的钢筋混凝土结构悬臂梁跨高比的分析研究[J]. 四川建筑, 2013, 33(02): 137-139.
- [6] 王强, 常凯, 侯康康, 等. 用于 ABAQUS 梁单元的混凝土单轴本构模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(05): 194-202.
- [7] 高向玲, 张业树, 李杰. 基于 ABAQUS 梁单元的钢筋混凝土框架结构数值模拟[J]. 结构工程师, 2013, 29(06): 19-26.
- [8] 尚兵, 庄茁. 基于 ABAQUS 梁单元的钢筋混凝土材料子程序[C]// 北京力学会. 北京力学会第 17 届学术年会论文集. 清华大学航天航空学院, 2011: 424-430.
- [9] 孙玉浩, 金鑫. 基于 ABAQUS 的混凝土梁桥长期变形研究[J]. 浙江建筑, 2025, 42(02): 11-15.
- [10] 杜泉锐, 王超, 陈星伊, 等. 基于 ABAQUS 的冻融损伤钢筋混凝土柱抗震性能有限元分析[C]// 中共沈阳市委, 沈阳市人民政府. 第二十一届沈阳科学学术年会论文集——自然科学类三等奖. 沈阳建筑大学, 2024: 151-155.
- [11] 丁雅博, 杨思乐, 蒋美幸, 等. 基于 ABAQUS 的轻骨料混凝土梁有限元分析[J]. 居舍, 2024, (12): 35-37.
- [12] 瞿帅. 基于 ABAQUS 有限元分析的钢筋混凝土柱扭转性能研究[J]. 砖瓦, 2024, (02): 74-76.

作者简介: 陆新硕(2003—), 男, 汉, 安徽省利辛县, 上海工程技术大学, 本科, 学生, 研究方向为工程管理。