

# 有限元大作业报告

## 暨 STAP++ 程序说明文档

组长：黄云帆

组员：陈一彤 邓博元 管唯宇 杨正宇 卢晟昊

2017 年 12 月 28 日

# Contents

<b>1</b>	<b>问题描述与成果展示</b>	<b>3</b>
1.1	问题简述与评测结果	3
1.2	变形图像与应力云图	4
<b>2</b>	<b>STAPpp 程序框架</b>	<b>7</b>
2.1	前处理模块	7
2.2	单元刚度阵组装	7
2.3	求解器设计	7
2.4	后处理模块	7
<b>3</b>	<b>基本单元</b>	<b>8</b>
3.1	Bar 杆单元	8
3.2	8H 实体单元	8
3.3	Euler-Bernoulli 梁单元	8
3.4	平板壳单元	8
<b>4</b>	<b>其他单元</b>	<b>9</b>
4.1	平面单元	9
4.1.1	3T 单元	9
4.1.2	4Q 平面单元	9
4.1.3	9Q 平面单元	9
4.2	构造单元	9
4.2.1	Timoshenko 梁单元	9
4.2.2	薄板单元	9
4.2.3	截锥壳单元	9
4.3	扩展单元	9
4.3.1	无限单元	9
4.3.2	过渡单元	9
<b>5</b>	<b>扩展功能</b>	<b>10</b>
5.1	稀疏求解器	10
5.2	模态分析	10
5.3	分片应力恢复 (SPR)	10
<b>6</b>	<b>致谢</b>	<b>11</b>
<b>A</b>	<b>输入文件格式</b>	<b>12</b>

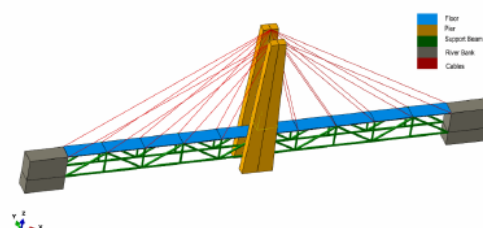
<b>B 输出文件格式 (后处理用)</b>	<b>13</b>
<b>C 优化思路简述</b>	<b>14</b>
<b>D 小组合作清单</b>	<b>15</b>
D.1 主干工作 . . . . .	15
D.2 细节性工作 . . . . .	15

# Chapter 1

## 问题描述与成果展示

### 1.1 问题简述与评测结果

- 扩展后的STAP++程序必须能够求解给定的桥梁问题（同时包括杆单元、梁单元、六面体实体单元和板单元），并用ABAQUS进行验证



- 除以上基本要求外，各组可以自行选择增加其他功能，包括但不限于分片应力恢复(SPR)、稀疏求解器、半带宽优化、无限单元、超级单元、过渡单元、模态分析、动力学响应分析和弹塑性杆单元等。

Figure 1.1: Problem

算例具体描述如下：

<i>Job</i>	<i>NumNode</i>	<i>NumEle</i>	<i>S4R</i>	<i>C3D8R</i>	<i>B31</i>	<i>T3D2</i>
1	4.16E3	2.88E3	4E2	1.76E3	7.04E2	20
2	3.72E4	3.04E4	2.5E3	2.65E4	1.35E3	20
3	\	2.33E5	1E4	2.2E5	2.7E3	20
4	1.91E6	1.81E6	4E4	1.76E6	5.42E3	20

经过大规模评测，测试结果如下：

<i>Job</i>	$t_A/s$	$t_B/s$
1	0.27	0.1016
2	2.35	1.18585
3	25.0 <sub>6244M</sub>	13.6638
4	\	3090.13

其中，环境 A <sup>[1]</sup> 和环境 B <sup>[2]</sup> 的说明见脚注。值得说明的是，本组在环境 A 中对 Job—3 进行内

<sup>1</sup>环境 A: CPU: Intel Xeon CPU e5-2620 v4, 2.10Hz, 16核; 内存: 64G; 操作系统: win10; MSVC 编译, O2 优化.

<sup>2</sup>环境 B: CPU: Intel Core i9-7920X, 4.40Hz, 12核; 内存: 32G; 操作系统: ubuntu16.04; clang 3.8.0 编译, O3 优化, Intel Parallel Studio XE 2018.1.038 静态链接.

存优化测试的结果为  $1385M_{132.63s}$ ，是所有直接求解刚度方程的小组中在相同测试环境下结果最优的，同时达到了比较高的求解精度。

## 1.2 变形图像与应力云图

这里我们仅以 Job-1 为例进行展示。其中，图 1.2 展示了利用 STAP++ 程序算得的系统变形后图像，由对称性可以初步判断计算结果的合理性。图 1.3 ~ 1.5 分别展示了利用 STAP++ 程序或 ABAQUS 软件计算得到的系统应力云图。为了便于对照，这里二者的位移放大倍数均取成了 107.7，并且尽可能地选取了一致的应力标尺。

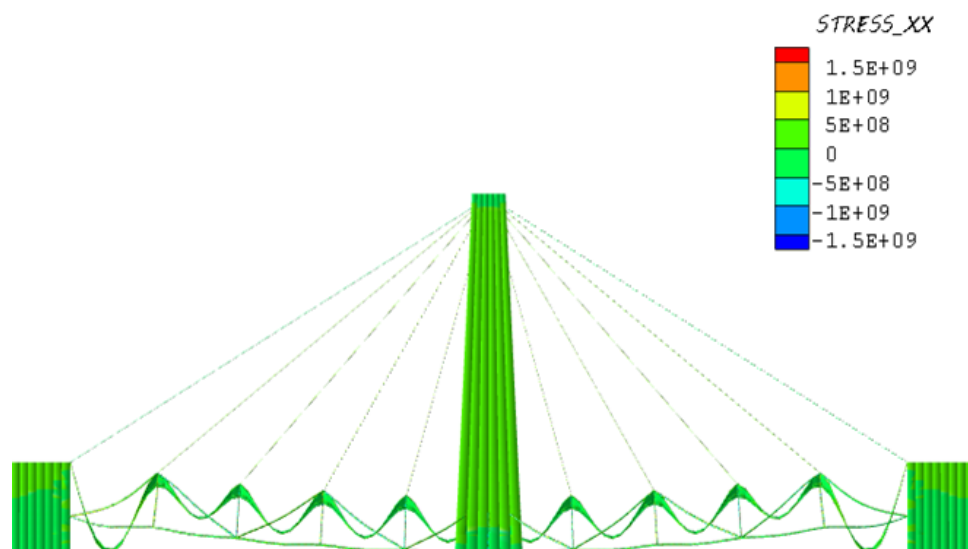


Figure 1.2: STAP++ 算得的系统变形后图像

对比图 1.3 与图 1.4 可以发现至少三方面的差异：

1. 梁的位移差异很大，STAP++ 的结果中甚至出现了明显的梁外翻的现象。这是由于在 STAP++ 程序中，将桥面附近相连的平板壳单元与梁单元的旋转自由度处理为固接约束，因此梁会随着桥面的平板壳单元发生较大的旋转。相比之下，由于固接的方式更接近工程实际，因此我们建议在下排两侧梁之间增加一些梁单元进行加固，以提高子系统的刚度。
2. 梁的图示应力有一定差异，STAP++ 的应力云图比 ABAQUS 的结果大了很多。实际上，这一差异是由于 STAP++ 输出的是梁表面的应力，而 ABAQUS 输出的是中性面上的应力，因此这一差异的出现是不足为奇的，并且 STAP++ 的输出更有利于材料力学中强度准则的应用。
3. 桥中心的桥柱变形有一定差异，STAP++ 的结果中变形稍小。注意到图 1.4 中桥柱顶端出现了明显的网格畸变，可以初步判断出现了零能模态。通过查阅 ABAQUS 文档我们了解到，建模时对三维实体单元使用的 *C3D8R* 实际上利用了减缩积分，而我们的 STAP++ 使用的是精确积分。因此，后者会出现一定程度的剪切闭锁，而前者尽管避免了剪切闭锁，却很有可能出现零能模态。我们还利用 ABAQUS 选取精确积分的实体单元进行建模，由此得到的图 1.5 中网格畸变现象消失，并且位移结果相比之下明显变小，这也在一定程度上验证了我们的上述判断。

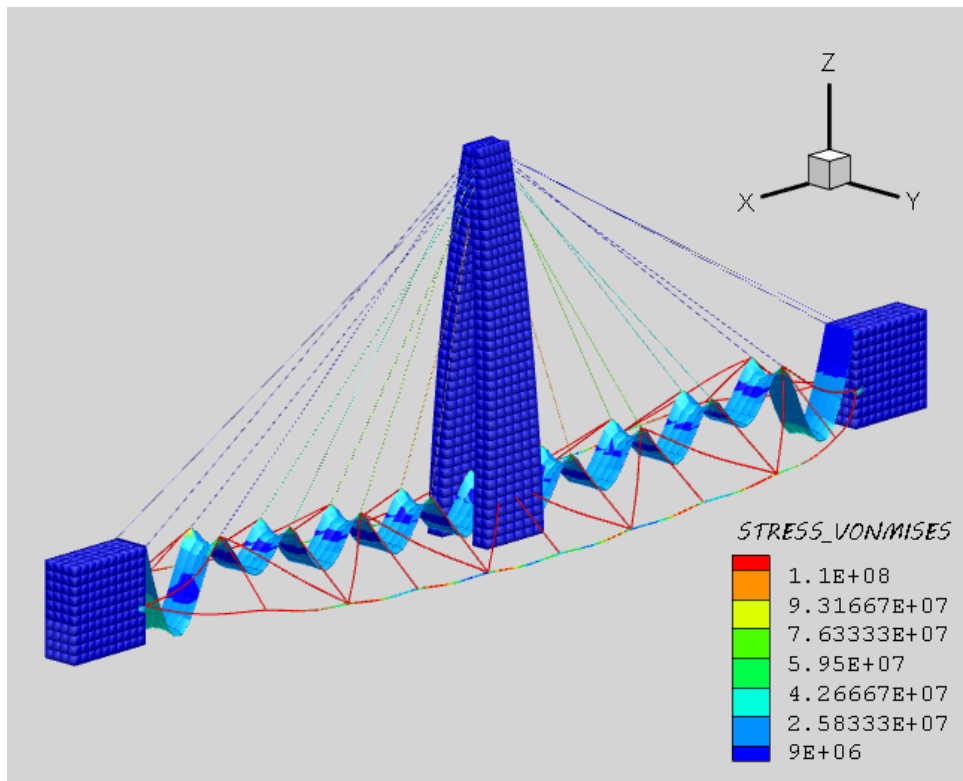


Figure 1.3: STAP++ 算得的 von Mises 应力云图

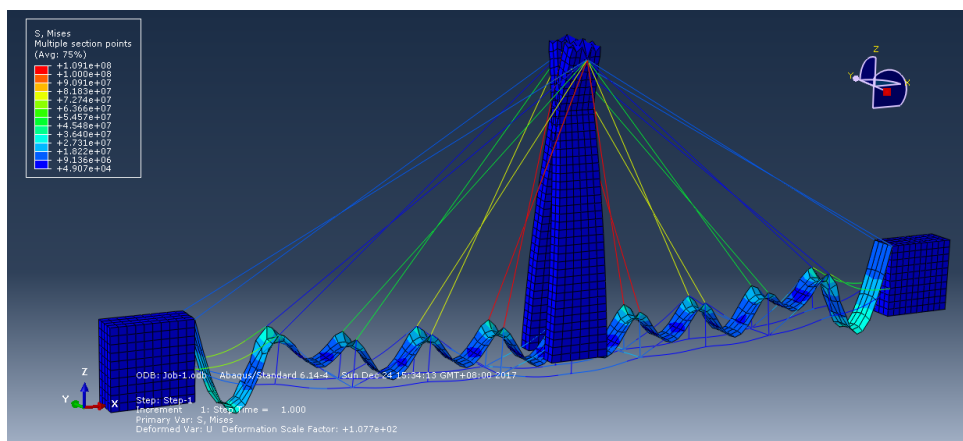


Figure 1.4: ABAQUS 算得的 von Mises 应力云图 (实体单元利用了减缩积分)

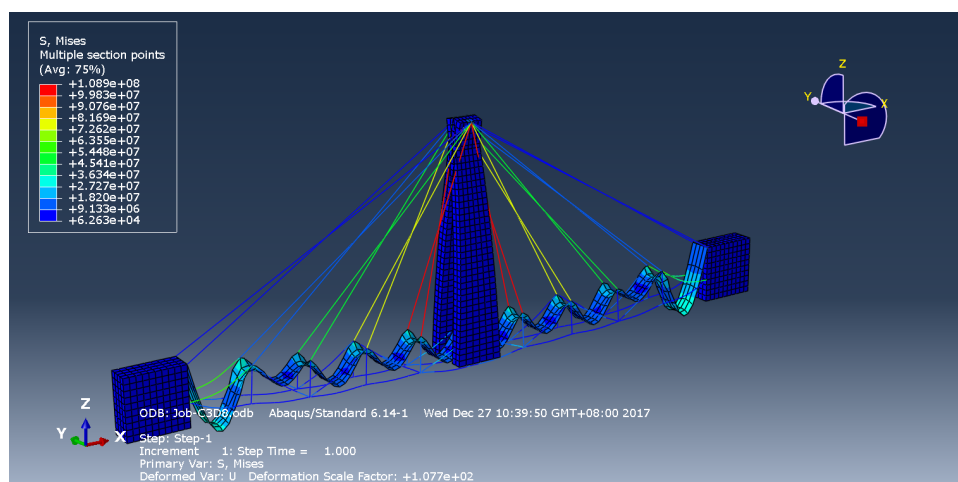


Figure 1.5: ABAQUS 算得的 von Mises's 应力云图 (实体单元未利用减缩积分)

## Chapter 2

# STAPpp 程序框架

2.1 前处理模块

2.2 单元刚度阵组装

2.3 求解器模块

2.4 后处理模块



## Chapter 3

# 基本单元

这一章着重介绍在桥梁算例中使用的各种单元类型。

### 3.1 Bar 杆单元

略。

### 3.2 8H 实体单元

### 3.3 Euler-Bernoulli 梁单元

### 3.4 平板壳单元

## Chapter 4

# 其他单元

### 4.1 平面单元

#### 4.1.1 3T 单元

#### 4.1.2 4Q 平面单元

#### 4.1.3 9Q 平面单元

### 4.2 构造单元

#### 4.2.1 Timoshenko 梁单元

#### 4.2.2 薄板单元

#### 4.2.3 截锥壳单元

### 4.3 扩展单元

#### 4.3.1 无限单元

#### 4.3.2 过渡单元

## Chapter 5

# 扩展功能

### 5.1 稀疏求解器

### 5.2 模态分析

### 5.3 分片应力恢复 (SPR)

## Chapter 6

### 致谢

感谢张老师和宋言学长在整个项目完成工作中对本组全组同学的耐心指导!

感谢在部分任务中，其余组的部分同学与本组同学的积极讨论与互相扶持!

最要感谢的，是我们组里的每一位同学，感谢大家一直以来的不懈努力以及团队所有成员的通力合作!

## Appendix A

### 输入文件格式

## Appendix B

### 输出文件格式 (后处理用)

## Appendix C

### 优化思路简述

# Appendix D

## 小组合作清单

### D.1 主干工作

**黄云帆(组长)** 铁木辛柯梁 (减缩积分与一致插值两个版本), 截锥壳; 统筹工作, 组织组会。

**管唯宇** 3T, 4Q, 9Q 单元; 前处理, 稀疏求解器; 效率/内存整体优化。

**陈一彤** 8H 单元; 后处理 (基于 tecplot); SPR (基于 8H)。

**杨正宇** 矩形板, 平板壳; 模态分析 (基于 Bar)。

**邓博元** 欧拉梁; 无限单元, 过渡单元 (基于 5Q)。

### D.2 细节性工作

**自动测试脚本** 搭建自动测试流程, 可以利用已有的分片试验结果, 在每一次的 push 和 Pull Request 操作之前对代码进行较为全面的自动测试。这部分工作由管唯宇同学完成。

**DOF 自动适配** 在兼容已有输入格式的基础上, 可以更灵活地适应不同的旋转自由度约束要求。这部分工作由邓博元、杨正宇、黄云帆、管唯宇四位同学共同完善而成。

**8H 刚度阵组装** 由于此前调用 Eigen 库进行运算的效率过低, 故改写为显式写法, 大幅提高了效率。这部分工作由黄云帆在陈一彤同学原来代码的基础上完成。

**STAP90 程序** 为已有用 Fortran90 语言编写的 STAP90 程序的完善, 增加了若干单元和后处理功能。这部分工作由卢晟昊同学完成。



# Bibliography

- [1] 张雄等. 计算动力学 (第二版). 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [2] 彭细荣等. 有限单元法及其应用. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2012.
- [3] 青克维奇, E.C., 泰勒, R.L. 著. 有限元方法 (第一卷, 基本原理). 曾攀译. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [4] 王勖成. 有限单元法. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] 薛守义. 有限单元法. 北京: 中国建材工业出版社, 2005.
- [6] 陆明万. 弹性理论基础 (第二版). 北京, 德国: 清华大学出版社, 施普林格出版社, 2001.
- [7] Zienkiewicz O C, Cheung Y K. The Finite Element Method for Analysis of Elastic Isotropic and Orthotropic Slabs. Proc. Inst. Civ. Eng. 28:471-488, 1964.
- [8] Wikipedia. Timoshenko beam theory. (2017.08.25) [2017.12.06].  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Timoshenko\\_beam\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Timoshenko_beam_theory).
- [9] MKL reference.  
<https://software.intel.com/en-us/mkl-developer-reference-c-spgvd#22ACC038-0667-4E23-8263-B4C0E67A769C>.