

一.选题

背景：斜拉桥(cable stayed bridge)作为一种拉索体系，斜拉桥比梁式桥的跨越能力更大，是大跨度桥梁的最主要桥型。斜拉桥由许多直接连接到塔上的钢缆吊起桥面，斜拉桥主要由索塔、主梁、斜拉索组成。索塔型式有 A 型、倒 Y 型、H 型、独柱，材料有钢和混凝土的。斜拉索布置有单索面、平行双索面、斜索面等。第一座现代斜拉桥是 1955 年德国 DEMAG 公司在瑞典修建的主跨为 182.6 米的斯特伦松德（Stromsund）桥。目前世界上建成的最大跨径的斜拉桥为俄罗斯的俄罗斯岛大桥，主跨径为 1104 米，于 2012 年 7 月完工。斜拉桥是由高强度钢索（拉索）、塔柱和主梁构成的组合体系。基本构想是，利用由塔柱引出的斜向拉索悬吊跨越桥孔的主梁，使主梁像跨径显著缩小的多跨弹性支承连续梁那样工作。

1 斜拉桥的优点

1.1 跨越能力大

连续梁桥与斜拉桥的承载内力与变形对比可见，因拉索提供多点弹性支承，使主梁弯矩、挠度显著减小，斜拉桥的跨越能力大大增强。

斜拉桥的经济合理适用跨径范围，目前较普遍的看法为 200~800m。斜拉桥和其他桥型在材料用量上的比较，每平方米桥面的混凝土用量，当 $L \geq 100\text{m}$ 后，斜拉桥最省；钢材用量，在 $L \geq 150\text{m}$ 后，混凝土斜拉桥也是最省的。至于钢斜拉桥，当 $L > 300\text{m}$ 后，其用钢量比悬索桥稍多。墩台混凝土用量，斜拉桥总是最少的。

1.2 建筑高度小

主梁轻巧，其高通常为跨径的 $1/100 \sim 1/50$ ，既能充分满足桥下净空需要，又有利于降低引道填土工程量。

1.3 受力合理

斜索拉力的水平分力为主梁提供预压力，可提高主梁的抗裂性能。

1.4 刚度大

与悬索桥相比，斜拉桥的竖向刚度与抗扭刚度均较大，抗风振稳定性好，且无须大型锚碇，故在适用跨径范围内，悬索桥总造价将比斜拉桥超过 20%~30%。

斜拉桥的拉索直接支在桥塔上，而悬索桥的吊索则悬挂在支承于桥塔间的柔性承重主缆上，故两者结构风动力性能差别很大。

1.5 桥型美观

高昂的桥塔、坚劲的斜索和轻盈的主梁相结合，似曼妙竖琴和远航的征帆，充分体现当代桥梁力与美的高度和谐。目前，雄伟飘逸的塔墩固结飘浮体系和稳健挺拔的塔梁固结单索面体系竞相媲美。

综合上，斜拉桥在用料和拉力上都有较大优势，并且可以从分发挥钢筋抗拉的优势，因此选用斜拉梁。

为了更好地接近优化标准，我们的桥梁几何结构与尺寸学习了苏通长江大桥：

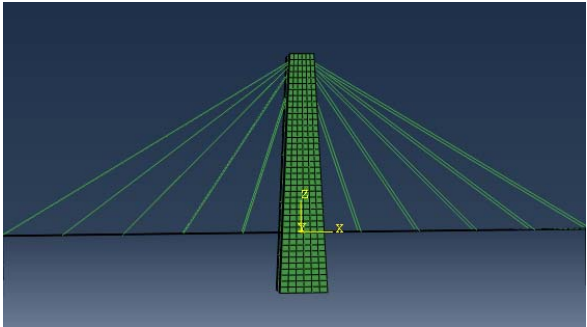


苏通长江公路大桥（Su-Tong YangZe River Highway Bridge），简称苏通大桥，位于中国江苏省境内，是国家高速沈阳—海口高速公路（G15）跨越长江的重要枢纽，也是江苏省公路主骨架网“纵一”——赣榆至吴江高速公路的重要组成部分，是当时中国建桥史上工程规模最大、综合建设条件最复杂的特大型桥梁工程。

苏通长江公路大桥的建成创造 4 项世界之最 [2] 。

- 1、最大主跨（斜拉桥）：苏通长江公路大桥跨径为 1088 米，是当时世界跨径最大斜拉桥。
- 2、最深基础：苏通长江公路大桥主墩基础由 131 根长约 120 米、直径 2.5 米至 2.8 米的群桩组成，承台长 114 米、宽 48 米，面积有一个足球场大，是在 40 米水深以下厚达 300 米的软土地基上建起来的，是当时世界上规模最大、入土最深的群桩基础。
- 3、最高桥塔：原先世界上已建成最高桥塔为日本明石海峡大桥 297 米的桥塔，苏通长江公路大桥采用高 300.4 米的混凝土塔，为当时世界最高桥塔。
- 4、最长拉索：苏通长江公路大桥最长拉索长达 577 米，比日本多多罗大桥斜拉索长 100 米，为当时世界上最长的斜拉索。

二、建模
桥面，桥架，拉索
1.初步建模

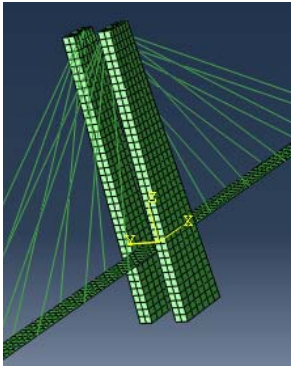


首次建模，从桥墩和钢索出发：
建立两种材料：

Steel 和 concrete，输入对应的材料参数

材料	密度 (kg/m³)	弹性模量 (MPa)	泊松比	价格	抗拉强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)
混凝土	2440	33500	0.2	500 元/m³	3.0	45
钢	7800	210000	0.3	5000 元/吨	750	750

Part



建立桥墩、桥面的 part，赋值材料属性 concrete，部分 mesh

建立钢索，形状与桥墩，桥面匹配，赋值材料属性 steel，选择 mesh 的 element type 为 truss

Assembly

将桥墩、桥面和钢索整合，将钢索旋转、移动到对应的位置，进行装配。

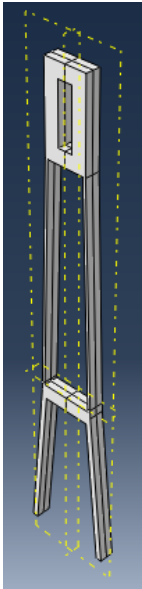
边界和加载

设置 job

批注 [H1]: 郑聚改一下

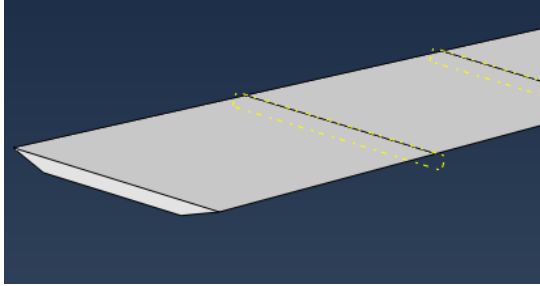
以下为具体优化

1.1 桥墩优化



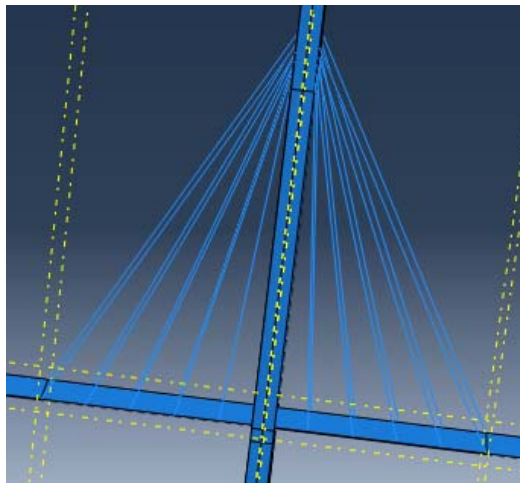
桥墩改善为镂空型支撑，利用混凝土的抗压性质，同时上方固连处镂空减少体积，下方采用分开支架。桥塔总高 165m，桥面总高 117m。桥塔最上 30m 为连接拉索区，拉索固定在桥塔边缘。桥塔底部成等腰梯形状，相比直立桥塔稳定性更强。

1.2. 桥架优化

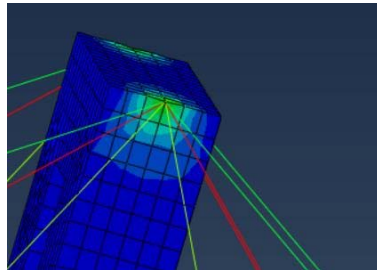


截面为等腰梯形。这样是为了节省材料，因为矩形截面的下方尖角处几乎不受拉压。这样相比矩形的桥面，我们在不影响安全的情况下节省了 3000 立方的混凝土。

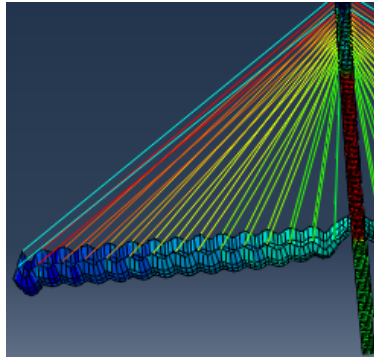
1.3. 拉索优化



将拉索分开到不同节点上（原拉索集中一点导致应力过于集中），同时在初步的测验中发现远离桥柱的钢索中应力远小于许用应力的 80%，因此可以在此处对钢索进行细化以节省材料



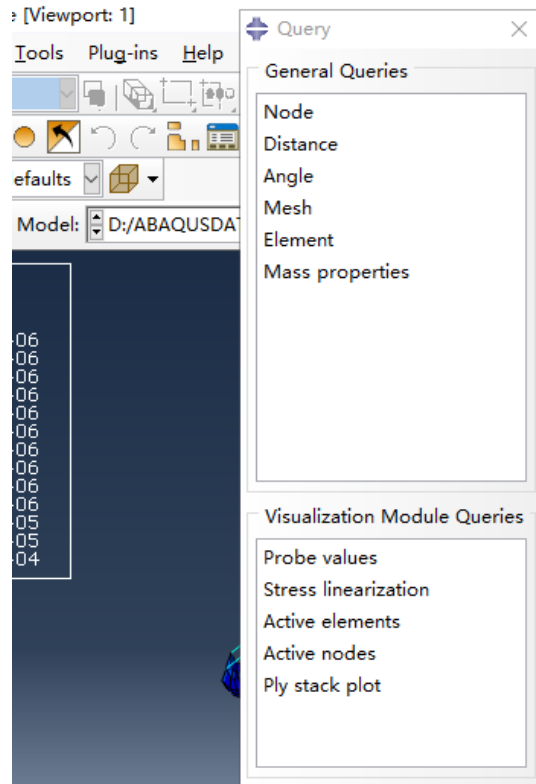
同时将拉索加密，使得桥梁的受力导致的形变减小，并减少靠近的拉索的截面积，增大更远钢索的截面积（远处拉力更大）。



每个桥塔覆盖 300m 桥面，其中每隔 10m 设置一个钢索连接点

三、数据采集和分析

3.1 质量：



通过 tools——Mass properties 获得两种 materials 的总质量如下：

```

Mass properties for Material: CONCRETE
Volume: 7.82405e+003
Volume centroid: 1.94423e-007, 2.26598e+001, 1.50000e+002
Mass: 1.90907e+007
Center of mass: 1.94423e-007, 2.26598e+001, 1.50000e+002
Moment of inertia about the origin (Ixx, Iyy, Izz, Ixy, Iyz, Ixz): 5.44028e+011, 4.98936e+011, 4.65920e+010, 0.00000e+000, 0.00000e+000, 0.00000e+000
Moment of inertia about the center of mass: 1.04685e+011, 6.93958e+010, 3.67896e+010, 8.41057e+001, 1.29883e+004, 5.56750e+001
Warning: Cannot continue yet--number of viewport entities picked is zero.

```

```

Mass properties for Material: STEEL
Volume: 2.24265e+003
Volume centroid: 5.28284e-005, 5.06287e+001, 1.50000e+002
Mass: 1.74927e+007
Center of mass: 5.28284e-005, 5.06287e+001, 1.50000e+002
Moment of inertia about the origin (Ixx, Iyy, Izz, Ixy, Iyz, Ixz): 5.12433e+011, 4.54936e+011, 5.94662e+010, -9.51301e+004, -1.62874e+005, -1.62874e+005
Moment of inertia about the center of mass: 7.40086e+010, 6.13495e+010, 1.46279e+010, -4.83437e+004, -7.24518e+004, -2.42577e+004
Warning: Cannot continue yet--number of viewport entities picked is zero.

```

Concrete:7.824*E03

Steel:1.749*E07

总价格为

P=9.136*E07

3.2 应力

通过 Tools——probe Value

设置获得每个 element 的内应力，处理后得到每个材料单元的内应力：

WIRE 150-1-RAD-2-LIN-2-1	1	T3D2	1	1.47099E+06
WIRE 150-1-RAD-2	1	T3D2	1	1.46766E+06
WIRE 150-1-LIN-2-1	1	T3D2	1	1.47087E+06
WIRE 150-1	1	T3D2	1	1.46782E+06
WIRE 140-1-RAD-2-LIN-2-1	1	T3D2	1	4.59711E+06
WIRE 140-1-RAD-2	1	T3D2	1	4.60513E+06
WIRE 140-1-LIN-2-1	1	T3D2	1	4.59718E+06
WIRE 140-1	1	T3D2	1	4.60511E+06
WIRE 130-1-RAD-2-LIN-2-1	1	T3D2	1	3.91158E+06
WIRE 130-1-RAD-2	1	T3D2	1	3.88839E+06
WIRE 130-1-LIN-2-1	1	T3D2	1	3.91159E+06
WIRE 130-1	1	T3D2	1	3.88837E+06
WIRE 120-1-RAD-2-LIN-2-1	1	T3D2	1	3.85926E+06
WIRE 120-1-RAD-2	1	T3D2	1	3.8886E+06
WIRE 120-1-LIN-2-1	1	T3D2	1	3.85927E+06

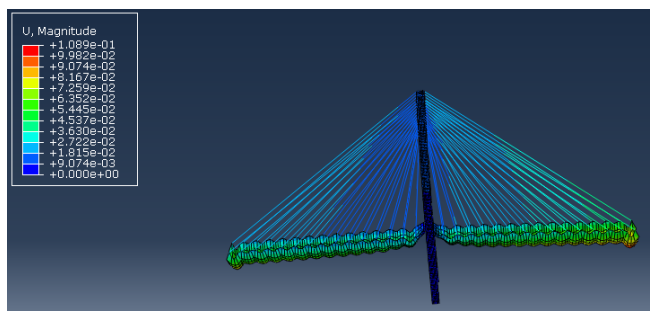
设置准则为最大应力 1/2:

Concrete:45E07 Pa

Steel:750E07 Pa

在无外载荷作用下，超出的比例为 0

3.3 最大位移



从输出文件中获得 Umax

最大位移为 u=1.089E-1

在此情况下，Pi 的取值为:

$$\Pi_i = \sqrt{0.4 \left(\frac{d_i}{a_{1,i}} \right)^2 + 0.4 \left(\frac{p_i}{a_{2,i}} \right)^2 + 0.2 \left(\frac{v}{a_{3,i}} \right)^2}$$

$$\Pi = \sqrt{0.4 * \left(\frac{0.1089}{a1} \right)^2 + 0.2(9.136 * 10^7/a2)^2}$$

批注 [H2]: 郑聚的钢丝粗细

四、stappp 验证

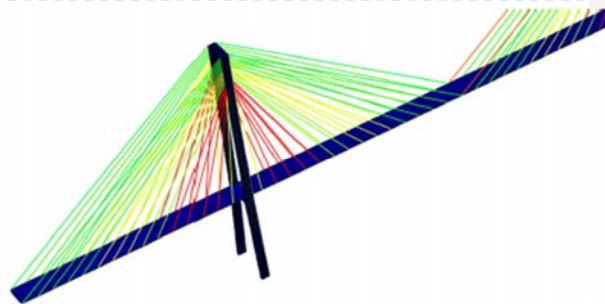
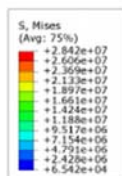
通过前处理将 inp 文件转化为 stappp 输入格式，并导入 stappp 计算得到计算时间约为 334s，得到结果转为后处理数据进行分析，将输出 dat 文件与 ABAQUS 计算得到的 obd 文件进行对比，发现其在位移和米塞斯应力等关键指标上相差小于 15%，故模型有效。

批注 [H3]: 司马

五、后处理

使用 tecplot 绘图获得：冯米塞斯应力图

批注 [H4]: 司马



位移云图

