



CSiBridge 在某高速铁路斜拉桥分析中的应用

司万胜¹ 吕良²

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司; 2. 北京筑信达工程咨询有限公司武汉技术中心)

本文以广西壮族自治区新建南宁至玉林高速铁路郁江百合特大桥为工程背景, 介绍 CSiBridge 桥梁设计软件在高速铁路无砟轨道斜拉桥结构分析中的应用, 展示 CSiBridge 进行桥梁结构分析的便捷和友好性能。

1 工程概述

郁江百合特大桥主桥为设计时速 350 公里无砟轨道高速铁路专用桥梁, 桥跨布置为 (36+40+64+330+64+40+36) m 双塔双索面钢-混凝土混合梁斜拉桥, 该桥为国内在建同类型桥梁最大跨度。主梁为两侧边跨预应力混凝土箱形梁+主跨正交异性钢桥面钢箱梁, 混凝土梁及钢-混结合段采用支架现浇, 钢箱梁工厂预制现场焊接拼装。桥梁主跨已于 2022 年 9 月顺利合龙, 大桥鸟瞰图如下图 1 所示:



图-1 郁江百合特大桥

1.1 主要技术标准

- (1) 铁路等级: 高速铁路
- (2) 设计时速: 350km/h
- (3) 轨道结构: 双块式无砟轨道
- (4) 线路间距: 直线、线间距 5.0m
- (5) 列车荷载: ZK 荷载

1.2 桥式布置及结构体系

主桥为 (36+40+64+330+64+40+36) m 双塔双索面钢-混凝土混合梁斜拉桥, 主桥全长 612m, 结构采用塔墩固结、塔梁分离的支承体系, 墩顶设置横向阻尼器共 20 套, 桥塔设置横向阻尼器共 8 套。主桥立面布置如下图 2 所示:

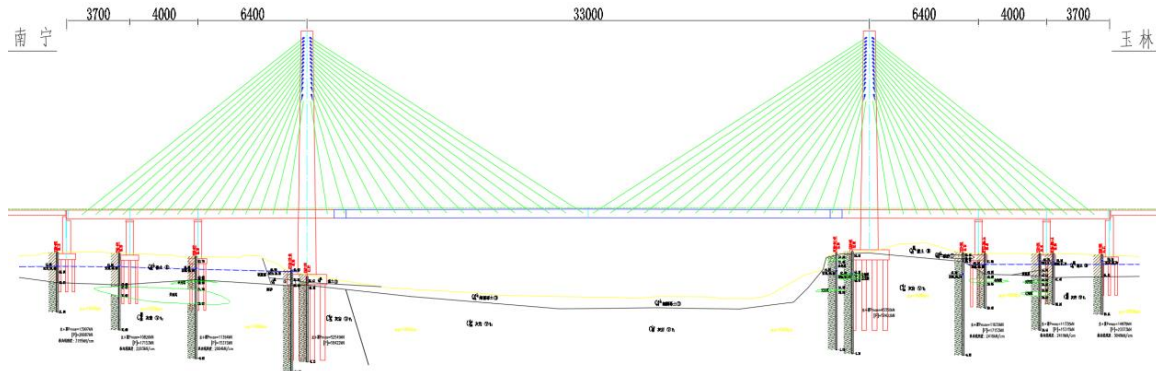


图-2 郁江百合特大桥主桥立面布置 (cm)



2 结构布置与有限元模型

CSiBridge 中有多种方式建立桥梁有限元模型，可以采用程序内置的桥对象基于参数化的方式建立，也可采用高级菜单中的绘制命令手动建立。一般来说简单桥梁采用桥对象参数建立模型较为方便，复杂桥梁可以采用高级菜单中提供的建模工具建模，对于大多数桥梁也可采用桥对象和高级菜单组合的方法建立模型。

郁江百合大桥结构较为特殊，该模型通过高级菜单中的命令采用手动建立。该模型主要采用框架单元模拟，其中主梁、桥塔、桥墩和基桩均采用框架单元模拟，斜拉索采用索单元模拟，形成全桥空间有限元模型，如图 3 所示：

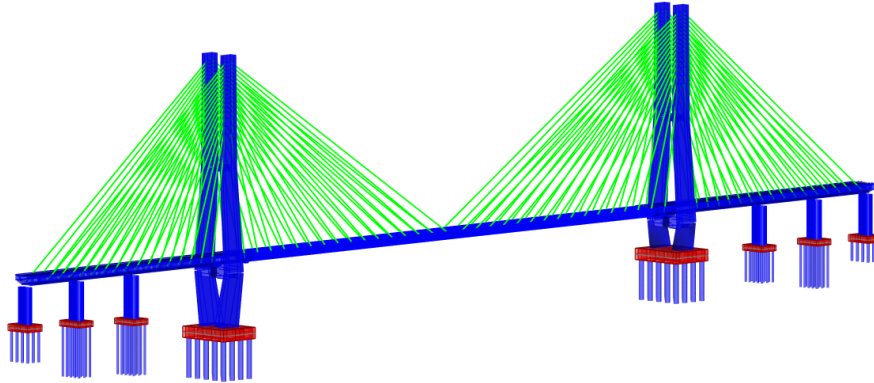


图 3 全桥空间模型

2.1 主梁

2.1.1 混凝土主梁

主梁混凝土强度等级为 C60，纵横向预应力钢束抗拉强度标准值为 1860Mpa。主梁全长 157m，单箱三室等高布置，其中伸入主跨部分 16m，截面有效高度 5.0m，桥面宽 15.2m，箱底宽 6.0m；顶板厚 40cm，底板厚 40cm，边腹板厚 130cm，中腹板厚 50cm、70cm；各墩塔位置均设置横梁，厚度 250cm；索梁锚固位置设置锚梁，锚梁高度 280cm，厚度 50cm。箱梁边腹板外侧设置风嘴。箱梁结构断面及桥面布置如图 4~5 所示：

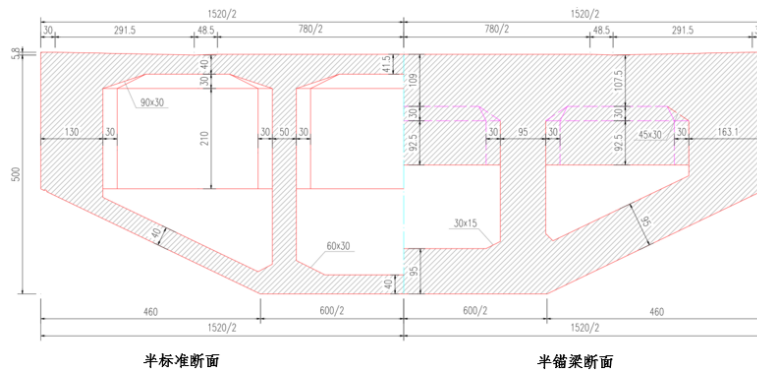


图 4 混凝土箱梁结构断面

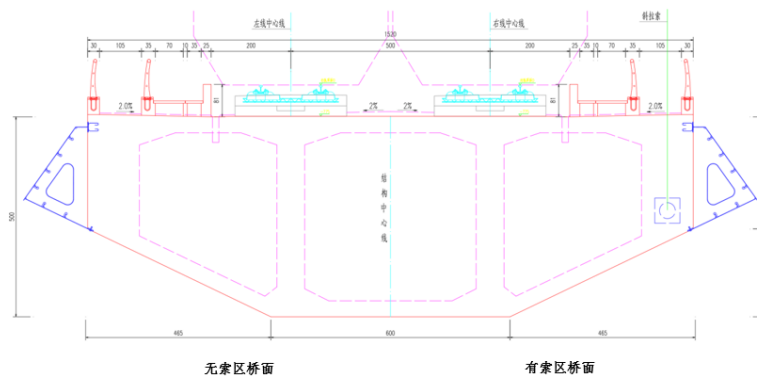


图 5 混凝土箱梁桥面布置



在 CsiBridge 中主梁可基于模板采用参数化方式建立，对于常规的混凝土箱梁截面和组合梁截面，参数化的方式建模效率较高。对于复杂的截面，则可通过 SD 截面设计器来定义。SD 截面设计器支持 DXF 文件的导入，可以定义任何形式及材料的复杂截面。该混凝土主梁形式较为复杂，无法通过主梁模板实现参数化定义，这里采用的是 SD 截面设计器定义，标准混凝土主梁的定义如图 6 所示。

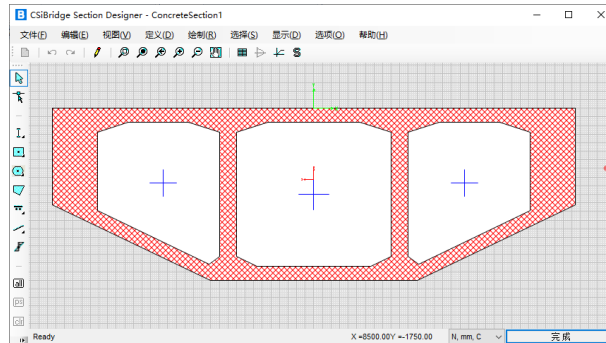


图 6 SD 截面设计器—混凝土箱梁定义

2.1.2 钢箱主梁

该桥主跨钢箱梁为正交异性钢桥面，全长 284m，共分成 28 个 10m 长标准吊装段和 1 个 4m 长合龙段，最大吊装梁段重 172.2t。钢箱梁单箱三室等高布置，有效截面高度 4.75m，为保证正交异性钢桥面与双块式无砟轨道良好结合，钢梁顶板顶增设有有效厚度 25cm 的混凝土构造层。钢箱顶板分区厚度 23mm 和 19mm、底板分区厚度 20mm 和 16mm、边腹板厚度 30mm、中腹板分区厚度 24mm 和 20mm；截面顶底板主加劲肋采用 U 形，腹板加劲肋采用板式，U 肋厚 8mm，板肋厚 16mm。钢箱梁结构断面及桥面布置如下图 7~8 所示：

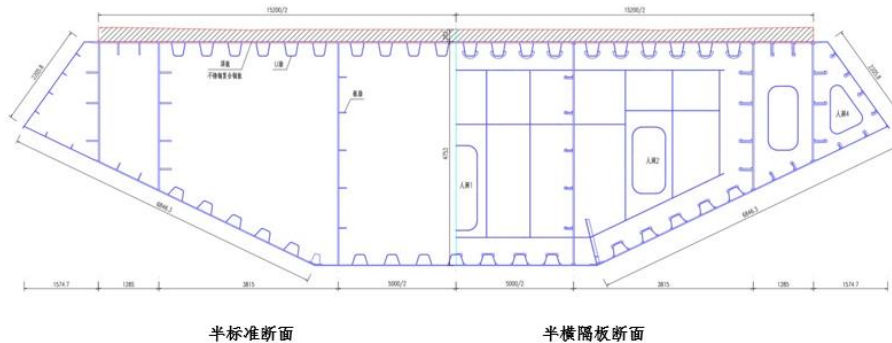


图 7 钢箱梁结构断面

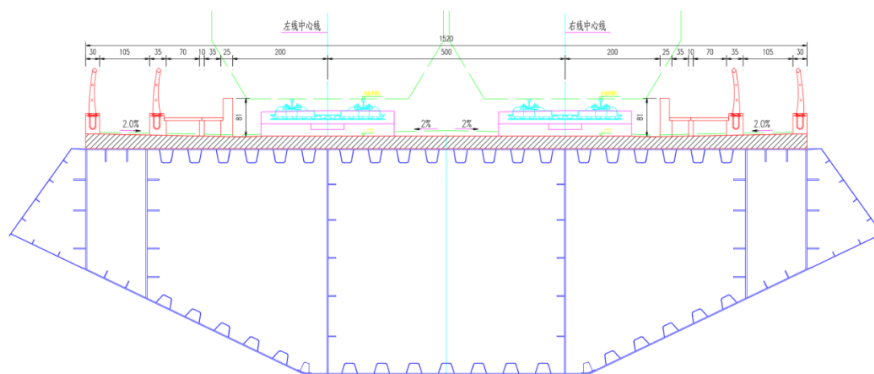


图 8 钢箱梁桥面布置

在 CsiBridge 中钢箱梁截面一般采用 SD 截面设计器定义，其定义方式与混凝土箱梁桥的定义方式类似，均采用导入 DXF 文件的方式定义，截面设计器中钢箱梁的定义如图 9 所示。

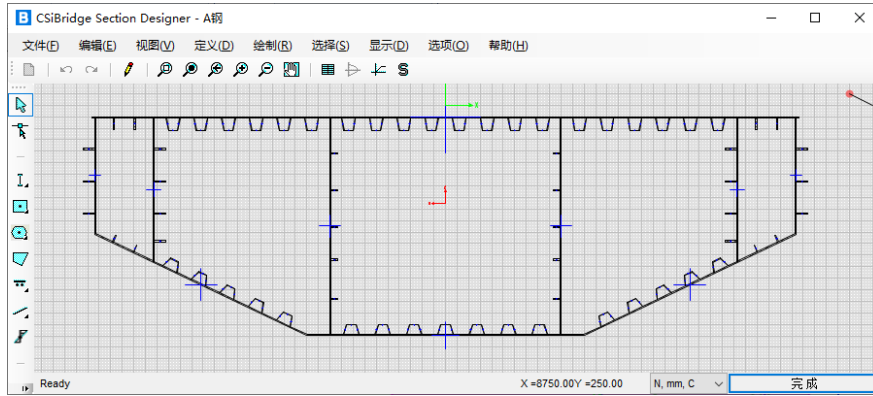


图 9 SD 截面设计器—钢箱梁截面定义

2.1.3 钢-混结合段

钢-混结合段全长 10m，包含 3m 钢-混结合区、3m 钢-混过渡区及 4m 刚度过渡区。结合区与过渡区设置纵横向预应力体系，边跨混凝土主梁纵向预应力伸过钢-混接合面锚固于钢-混过渡区端面；钢-混结合区与过渡区顶底板设置横向预应力体系。钢-混结合段全长范围内顶底板设置剪力键与主梁顶底板混凝土及钢箱梁顶板混凝土构造层结合，同时贯通钢箱梁横向腹板间开孔设置 PBL 键增强钢混连接，加强钢-混结合段整体性。钢-混结合段立剖面布置如图 10 所示：

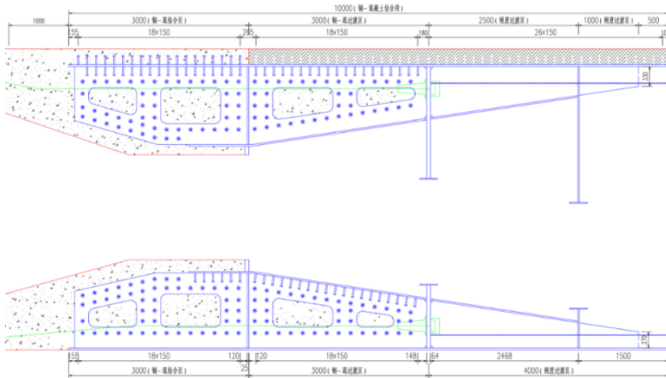


图 10 钢-混结合段立剖面布置

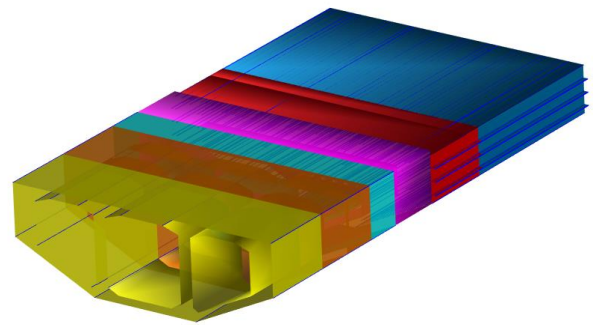


图 11 变截面模拟钢-混结合段

钢-混结合段范围内，主梁截面属性是一直变化的，在建模时，可以将其视为变截面处理，如图 11 所示。在 CSiBridge 中首先通过 SD 截面设计器定义各个控制截面，中间截面属性通过两端截面属性内插获得，变截面定义如图 12 所示。程序中有多种内插方式确定变截面属性，具体细节可以参考知识库文章“[变截面高墩的正确模拟方式](#)”。



图 12 钢-混结合段变截面定义

2.2 桥塔

桥塔为钻石型钢筋混凝土结构，塔柱及横梁为空心矩形截面，桥面塔高 105m。塔柱内索塔锚固处预埋钢锚箱，塔柱壁厚四周设置环向预应力钢束，桥塔横向及纵向布置如图 13 所示。该桥塔采用框架单元模拟，截面同样采用 SD 截面设计器定义，变截面的处理方式与钢-混结合段类似，桥墩模型如图 14 所示。

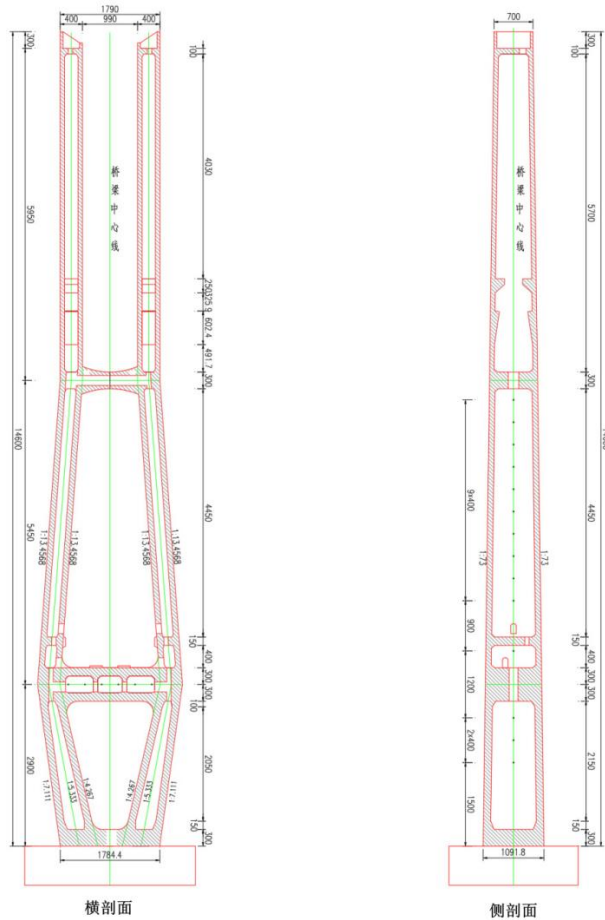


图 13 塔柱立剖面

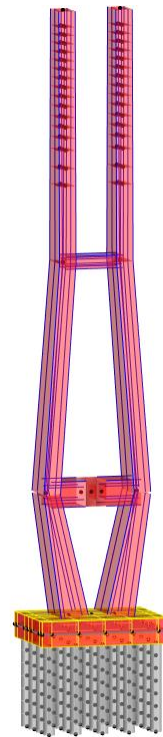


图 14 塔柱模型三维模型图

2.3 斜拉索

斜拉索按扇形平面布置，全桥共 64 对。边跨索间距 8m，主跨索间距 10m。斜拉索采用直径 7mm 高强镀锌钢丝，钢丝抗拉强度 1670MPa，其材料满足《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》(GB / T 18365—2018) 要求的各项性能指标。

CSiBridge 中可采用悬链线单元 (Cable) 或直框架来模拟索，采用悬链线单元模拟索时，程序会自动考虑索的 P-Delta 和大位移效应，大多数条件下尤其是结构比较柔时，悬链单元模拟索会更加适合。本模型中斜拉索采用悬链线单元模拟。

2.4 桥墩基础

边墩及辅助墩截面形式为圆端形，纵横向结构尺寸分别为 4.2m 和 8.2m。

桥塔桩基础共设置 20 根 $\varnothing 280$ 基桩，矩形布置；边墩桩基础 12 根 $\varnothing 150$ 基桩；辅助墩桩基础 15 根 $\varnothing 125$ 基桩。

模型中墩柱及桩基均采用框架单元模拟，承台采用壳单元模拟，模型如图 14 所示。

3 结构分析及主要指标

大跨度斜拉桥结构分析大体可分为整体分析及局部分析。局部分析视桥梁结构受力条件和构造特点而定；整体分析内容较多，主要有施工阶段分析、运营阶段分析、抗震分析、抗风分析及稳定性分析，高速铁路大跨斜拉桥尚应进行车桥耦合分析，本案例重点介绍施工阶段分析及运营阶段分析。

3.1 施工阶段分析

为减小混凝土收缩徐变效应及预应力钢绞线损失，边跨混凝土箱梁采用支架分段现浇施工，为保证钢-混结合段施工质量，钢-混结合段亦在支架上安装，待钢-混结合段满足要求后安装 C01、C02 号拉索，后续依次吊装焊接 01 段钢箱、安装 C03 拉索，直至吊装焊接 14 段钢箱、安装 C16 拉索达到最大悬臂状态，选择合适的温度合龙后进行二次调索并施工桥面系及轨道结构达到初期成桥状态。

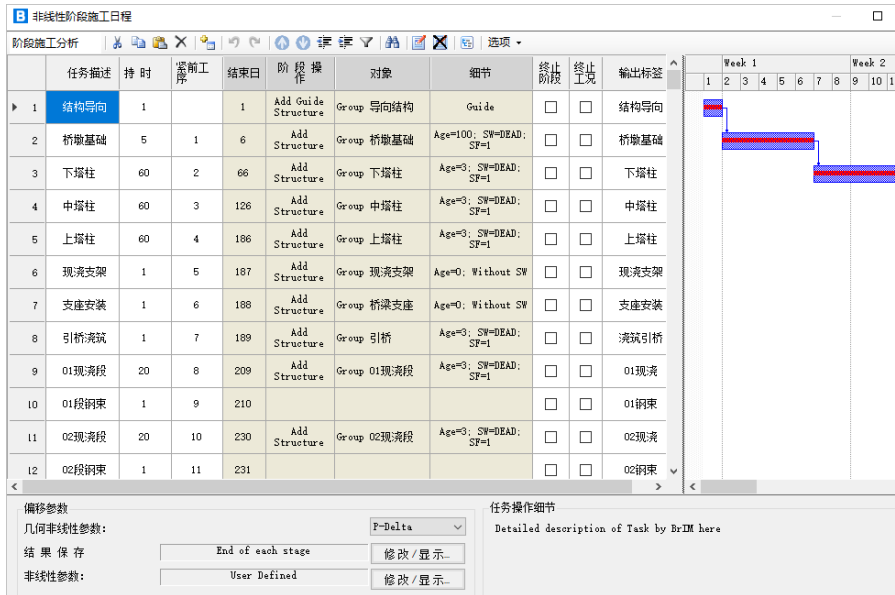


图 15 阶段施工进度表

该模型施工步骤较为复杂，在 CSiBridge 中可采用施工进度计划横道图编制，如图 15 所示。该图可直观地显示出各个施工阶段状况的逻辑关系，简单直观，方便检查。另外在施工阶段分析中需要考虑拉索非线性及 P- Δ 几何非线性，保证计算结果的准确性。分析完成后可通过图形、表格、隔离体图等方式来查看结果。施工阶段分析所得初期成桥状态塔、梁弯矩如图 16 和表 1 所示：

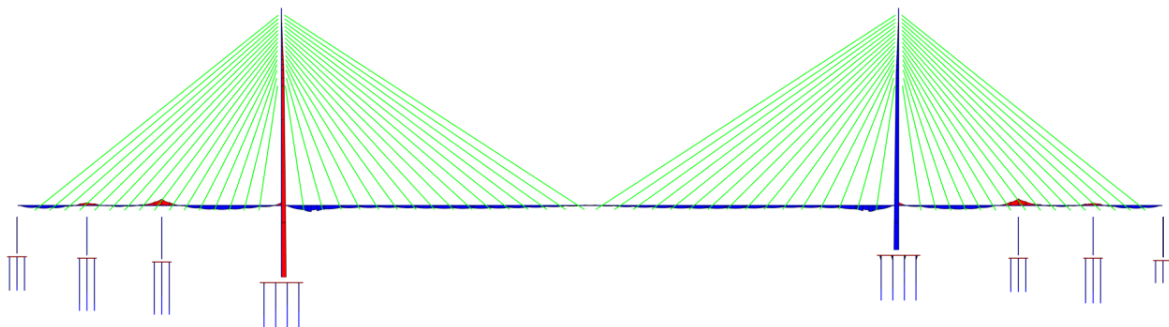


图 16 初期成桥塔梁弯矩图

表 1 初期成桥主要控制弯矩

项目	混凝土梁负弯矩	混凝土梁正弯矩	结合面弯矩	主跨跨中弯矩	塔底弯矩
弯矩 (kN·m)	-48892	30693	46205	-1883	36093

3.2 运营阶段分析

运营阶段分析则考虑施工后三年塔梁混凝土收缩徐变效应、结构自重、二期恒载、ZK 列车荷载及温度作用，温度作用主要考虑混凝土整体升温 20℃，钢梁升温 25℃，拉索升温 35℃等。在 CSiBridge 中可以采用接续分析，即继承施工阶段工况后的刚度做运营阶段分析。以工况“均匀升温”为例，如图 5-3 所示，其继承了“阶段施工分析-1”后的结构的刚度矩阵，考虑了成桥后的状态下桥梁承受荷载的效应。其他工况也可做类似处理，这里不再赘述。



图 17 均匀升温工况定义

限于篇幅，案例重点分析上述 5 种工况不利组合下塔梁弯矩、拉索索力和主跨梁竖向位移情况，分别如下图 18~20 和表 2 所示：

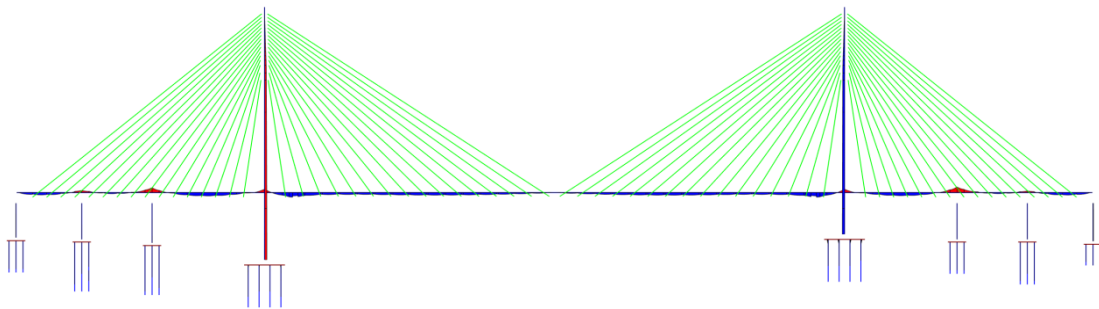
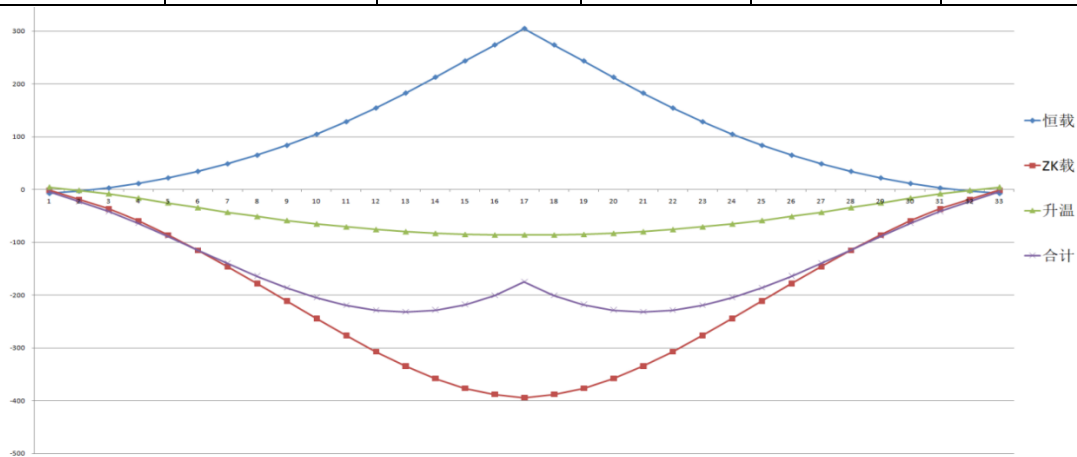


图 18 最终成桥塔梁弯矩图

表 2 最终成桥主要控制弯矩

项目	混凝土梁负弯矩	混凝土梁正弯矩	结合面弯矩	主跨跨中弯矩	塔底弯矩
弯矩 (kN·m)	-47066	31387	43057	133	22433



注：恒载=收缩徐变效应+结构自重+二期恒载

图 19 最终成桥主跨位移图

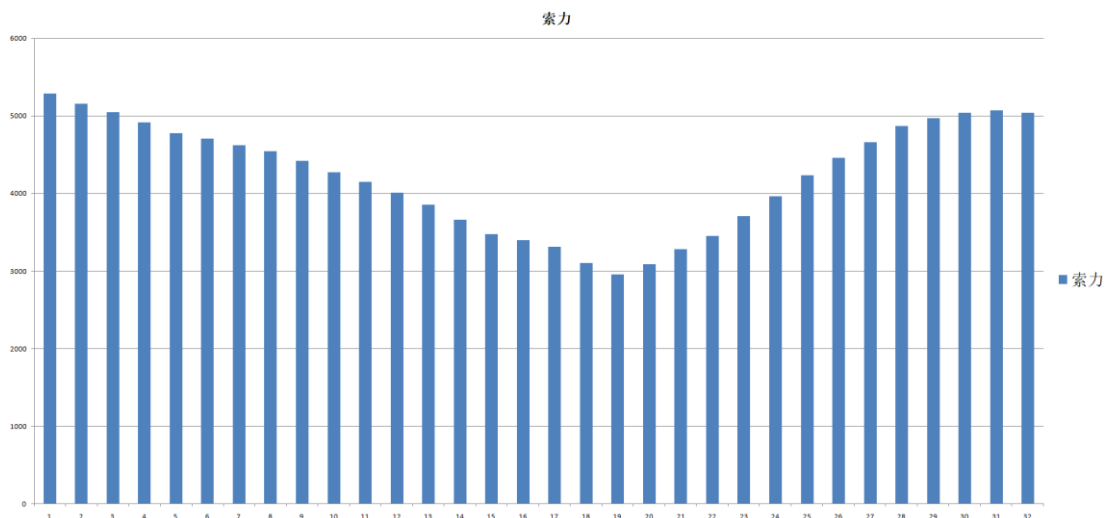


图 20 成桥不利工况索力图

从图 19 可见，恒载作用下主跨梁最大竖向位移 305mm（上拱）；ZK 活载作用下主跨梁最大竖向位移-394mm（下挠），主跨梁竖向挠跨比为 1/838；温度作用下主跨梁最大竖向位移-86mm（下挠）；最不利工况组合作用下主跨梁最大竖向位移-228mm（下挠），拟合挠曲线等效半径 59704m，大于《铁路工程沉降变形观测与评估技术规程》（Q/CR 9230—2016） $R_{sh} \geq 0.4V_{sj}^2=49000m$ 的最低要求。

4 结束语

本案例重点介绍了该斜拉桥在 CSiBridge 的模拟方法与分析设置，包括特殊主梁截面的处理、斜拉索模拟及其他结构单元的处理。通过定义施工进度计划横道图快速完成施工进度的编制，且能同时考虑结构、荷载和边界条件的变化及混凝土的收缩徐变效应。最后通过接续施工阶段分析完成桥梁运营阶段分析，展示了程序强大的分析功能。限于篇幅，本文仅阐述了高速铁路无砟轨道结构对大跨度桥梁刚度和线形的特殊要求。总的来说，CSiBridge 具有建模快捷、功能丰富、计算结果可靠的特点，适用于复杂桥梁的分析与设计。