

CSiBridge 导向结构的功能及应用

筑信达 吕 良

桥梁的施工过程决定了桥梁最终的受力状态，因此如何准确的模拟桥梁在施工过程中各个状态的变化是工程师致力于解决的问题。

早期版本的 CSiBridge 在进行施工阶段分析时，只有**添加结构**（Add Structure）这项功能可用于模拟在不同的施工阶段激活不同的结构组或者对象。对于常规混凝土梁桥，该功能已能较为精确的模拟结构在不同阶段结构形式的改变。但是对于斜拉桥结构，该功能却存在一些不合理的地方。

普通混凝土梁桥主要受弯，在施工阶段会依据预供度及施工条件调整各个施工节段主梁的标高，并没有严格限定各个梁段保持结构平直。与常规梁桥不同，斜拉桥主梁既受弯也受压，为避免在主梁内产生较大的次应力，一般要求主梁保持平直。因此在施工阶段，后施工的梁段需要考虑之前施工梁段的影响。直接采用（Add Structure）做施工阶段分析时，激活的新结构会位于该结构未发生变形前的位置。这会导致相邻界面上的连接单元会发生扭曲，与斜拉桥“梁平塔直”的要求不符合。

为了避免上述问题引以的结构变形不连续，老版 CSiBridge 在进行斜拉桥施工阶段分析时，需要进行一些手动操作，较为繁琐。但是在 CSiBridge V19.2.1 及之后的版本中软件添加了一个新的功能：**添加导向结构**（Add Guide Structure）。该功能的原理是在进行施工阶段分析时，先将结构在其施工阶段前激活，激活时为该结构指定一个很小的刚度折减系数，并且激活的该结构时不施加任何荷载，包括自重及时间效应。在后续相应的施工阶段**使用添加结构**（Add Structure）激活这些结构时，将对应结构的刚度恢复至正常值。该功能实现了新激活的构件与已经激活的结构变形保持一致。在使用该功能模拟斜拉桥悬臂施工时，可以先将悬臂施工段通过**导向结构**（Add Guide Structure）添加到模型中，然后再通过添加结构（Add Structure）逐个节段激活，便能真实模拟斜拉桥悬臂施工段实际情况。

本文主要从导向结构的功能及应用来介绍该功能。首先通过一个简单的斜拉桥模型，分别采用导向结构（Add Guide Structure）和添加结构（Add Structure）做施工阶段分析，介绍其功能特点。然后针对该模型，采用导向结构（Add Guide Structure）功能，结合 CSiBridge 荷载优化器，介绍 CSiBridge 在斜拉桥施工阶段分析中的应用。

1 工程背景介绍

该模型为 2×100m 独塔斜拉桥，左右对称设计。拉索采用斜向双面布置，两侧各布置 9 组斜拉索。主梁为钢箱梁，宽 8.4m，由拉索均匀分成 10 个节段，每个节段长 10m。主塔采用单柱式塔柱，以桥面为基准面，桥塔顶面标高为 50m，桥墩底面标高为-20。梁及主塔采用梁单元建立，拉索采用索单元建立，模型分析模型如图 1-1 所示。

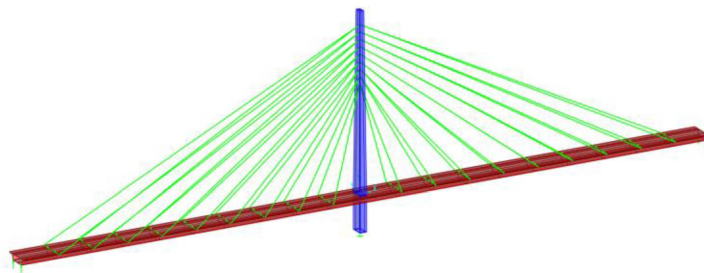


图 1-1 分析模型图

该斜拉桥采用支架进行分段施工，具体施工步骤如下：

- 1) 浇筑桥梁基础及主塔柱，并进行养护；
- 2) 架设支架安装 1 号段，待安装完成后，张拉 1 号块斜拉索，然后拆除 1 号块支架；
- 3) 依次对 2~9 号节段进行施工，分别按搭设支架、安装节段、养护、张拉斜拉索、拆除支架的顺序进行，形成 9 ×10m 对称悬臂结构；
- 4) 架设两端边支架并进行预压，架设主梁 10 号段，安装 10 号段支座，完成桥梁主体结构施工。



2 导向结构的功能介绍

现采用 CSiBridge 模拟该桥梁结构在形成 $9 \times 10\text{m}$ 对称悬臂结构过程中不同的施工状态下的变化,分别采用导向结构(Add Guide Structure)和添加结构(Add Structure)两种方式来模拟,并提取各个阶段下结构产生的弯矩及位移。需要注意的是,该分析过程仅为说明导向结构的功能,并未考虑斜拉桥正装施工并调整索力的问题,因此所有的索力均保持默认值。

在安装主梁节段过程中,假设在新安装的主梁在张拉斜拉索之前,新安装段的重力全部由支架承担,直到张拉完成之后,该节段才完全脱离支架承受荷载。因此,为模拟支架对新安装节段的支撑作用,在建模时采用先不激活结构的自重。待斜拉索张拉完成之后,同时激活新安装节段的重力荷载和斜拉索张拉荷载。

分别在 CSiBridge 设置两个施工阶段分析工况,其中“add”工况采用添加结构(Add Structure)做施工阶段分析,“guide”工况和“add”工况一致,仅在最开始阶段将主梁通过导向结构功能激活,如图 2-1 所示。

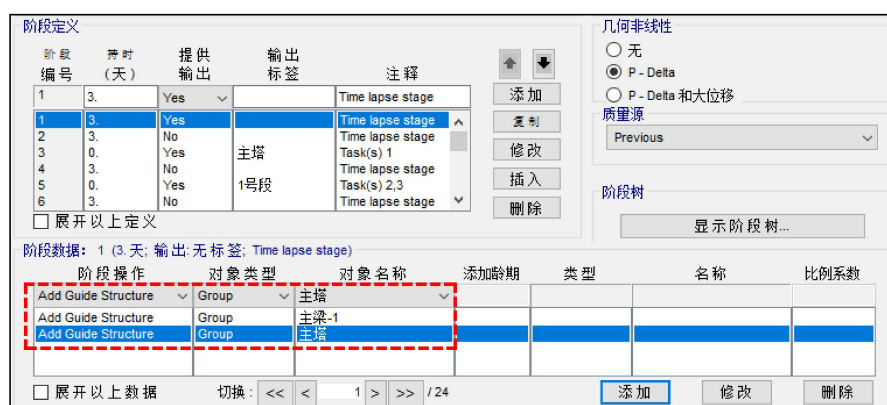
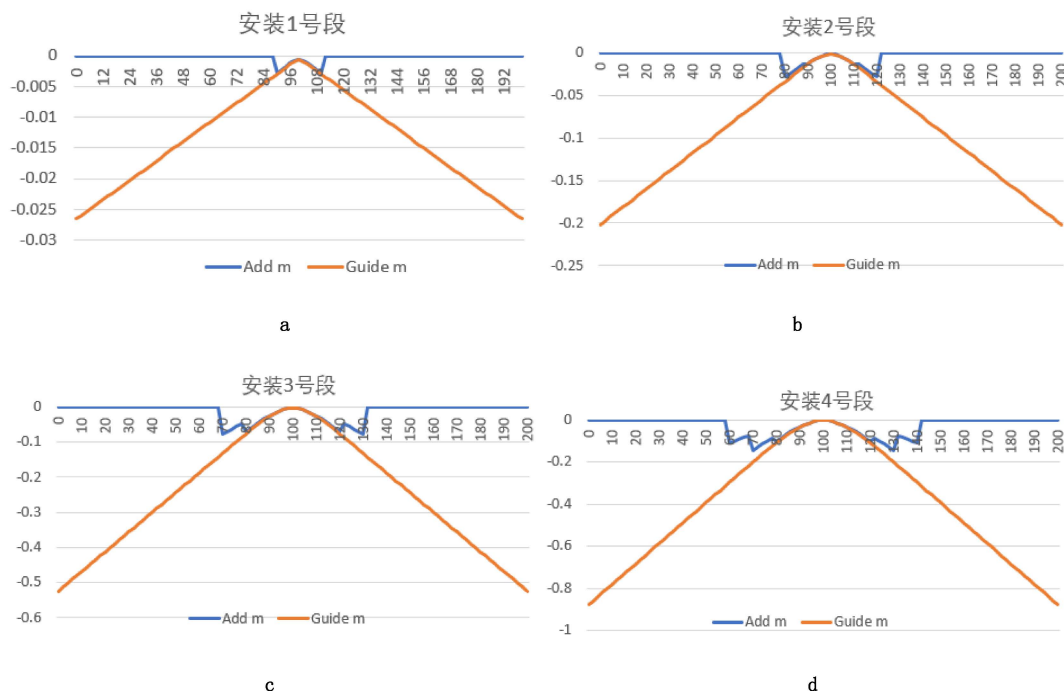


图 2-1 设置导向结构工况

将两个工况进行运行分析,分别将主梁在每一个阶段的位移值提取出来,放入一个表格中对比分析,如下如所示。其中“Add”表示直接采用(Add Structure)分析结果,“Guide”表示采用导向结构(Add Guide Structure)分析结果。



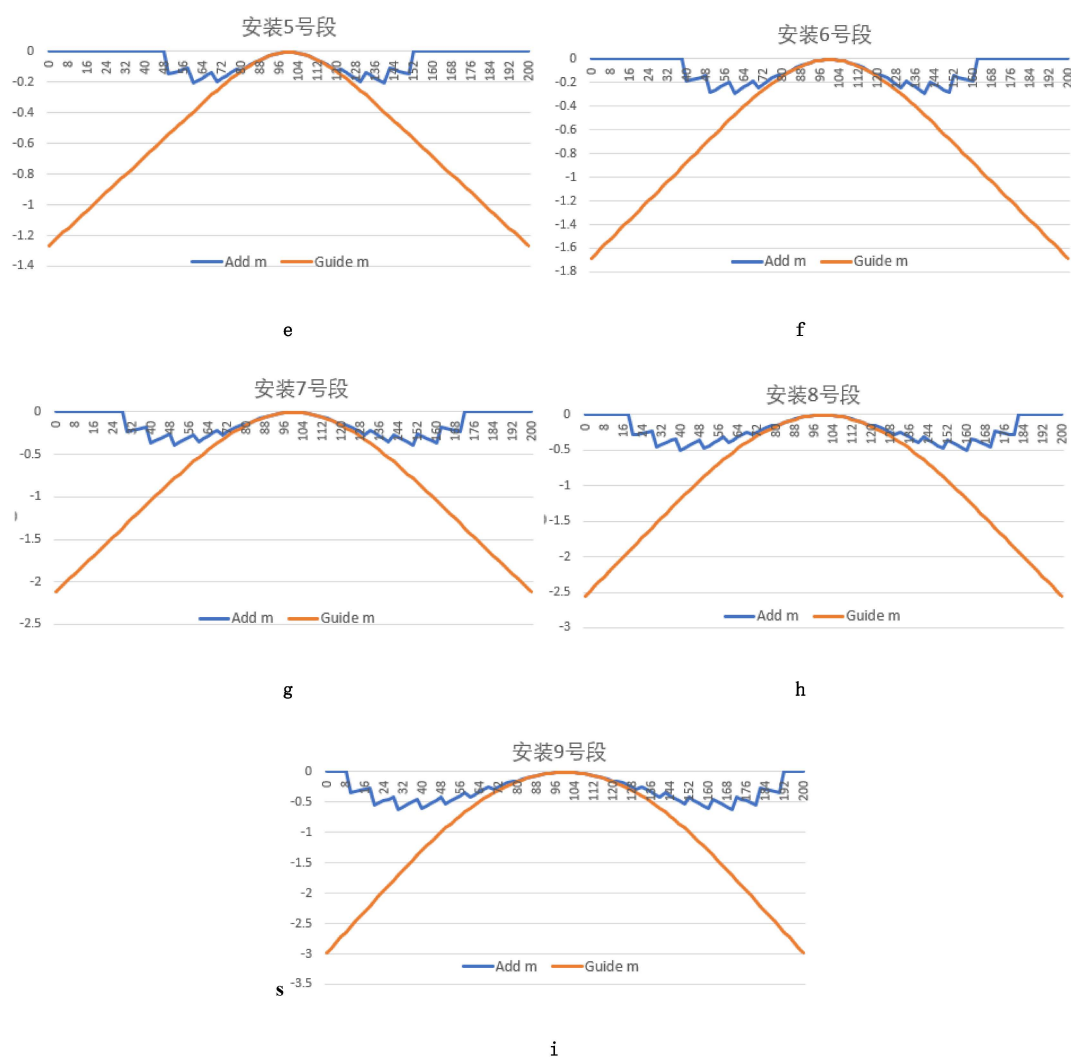


图 2-2 各施工阶段主竖向位移值

在第一阶段仅激活“1号块”时，如图 2-2a 所示。由于采用（Add Guide Structure）是先激活了主塔及 $9 \times 10\text{m}$ 对称悬臂结构内的所有结构段，所以整个结构内所有的控制节点均产生了竖向位移，产生的位移形式与悬臂结构一致。但是在“1号块”范围内，两种方式模拟产生的节点位移一致。表明通过（Add Guide Structure）激活的“1号块”以外的结构并没有对“0号块”施加任何荷载。

在第二阶段仅激活“2号块”时，如图 2-2b 所示。两种方式模拟得出的节点位移并不重合。采用（Add Structure）激活的结构在“1号块”和“2号块”接触面位置，节点位移发生突变，变形不协调。这是由于新添加的“2号块”激活时位于“2号块”未发生变形时的位置，但是“1号块”已经发生变形，接触面上为了保证结构的连续会导致该位置的单元发生扭曲，最后形成如图中所示的折线形状。

而通过（Add Guide Structure）方式添加时，由于结构已在之前添加，前置施工段产生的变形也会对该分段产生相应的变形，新激活的“2号块”沿“1号块”的切线方向添加，两者变形相协调。激活“2号块”时仅修改了该段结构刚度及添加相应的荷载，因此该段的变形与“1号块”是平滑的。

斜拉桥在施工过程中需要保持相邻的安装的主梁竖向位移不会在接触面发生突变，而整体的梁端的竖向位移可通过拉索来调整，使整个梁的变形一致，以减小梁截面不平整引起的次应力。因此，采用导向结构（Add Guide Structure）来模拟斜拉桥的施工才是合理的。

另外，通过（Add Guide Structure）方式添加“2号段”的变形由两部分构成，一部分是与协调“1号块”产生的变形，另一部分是由于“1号块”本身产生的变形，因此其结构的变形量是大于采用直接添加（Add Structure）的方式模拟。并且随着施工阶段的逐渐增加，后续添加的结构在采用这两种方式模拟时两者的竖向位移差别会越来越大。由图 2-2 c 至 i 中可以看



出，激活“9号块”时，两种模拟产生的端点竖向位移差别最大。

3 导向结构的功能应用

一般进行斜拉桥的设计时，需要确定能满足成桥阶段设计条件(主梁弯矩分布均匀、索塔弯矩较小作用、索力分布均匀)的各施工阶段索的张力，因此需要进行较为精确的施工阶段分析。之前曾介绍过如何通过 CSiBridge 中荷载优化器找出斜拉桥的最优成桥状态，该功能也同样可以用于斜拉桥的施工阶段分析。

依据上述模型，采用导向结构（Add Guide Structure）功能建立正装施工的分析工况“正装”，在该工况中可以考虑混凝土的时间效应。然后打开荷载优化器，选择荷载工况为“正装”如下图所示。

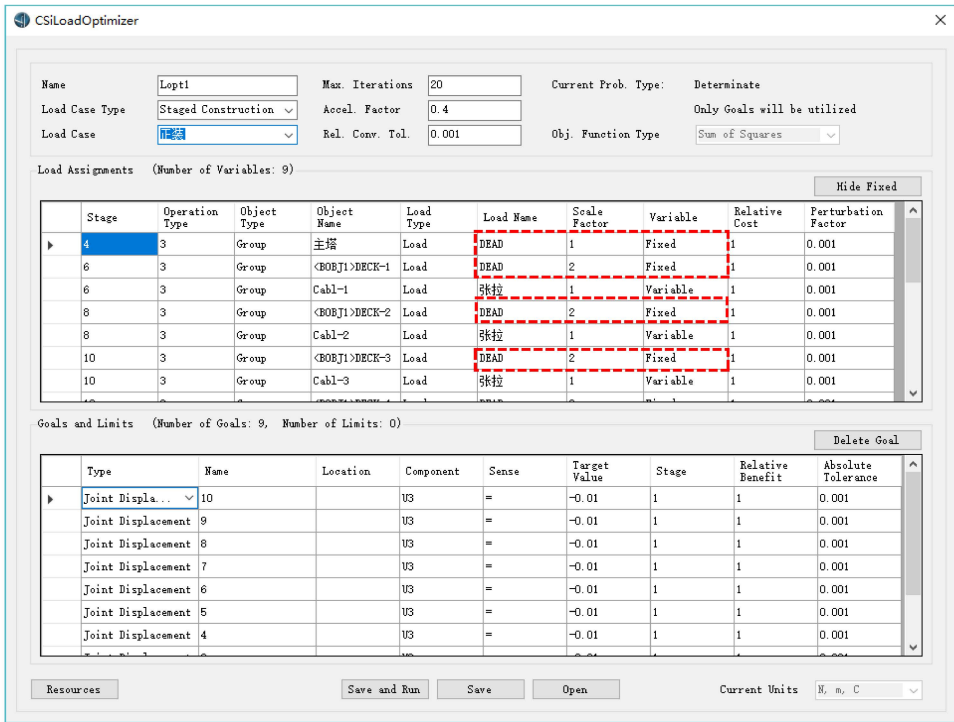


图 3-1 施工优化

该斜拉桥所有初始索力均设置为-0.001 初始应变荷载（负值表示将索拉紧），并将梁重放大两倍来考虑结构的二期荷载。在该优化工况中，结构自重为不可变化量，因此需要将其设置为“Fixed”；仅索力为可变化量，即优化对象。由于该斜拉桥为对称结构，因此仅需优化一侧的索力，另一侧的索力与其保持一致即可。同样当一侧的结构达到最优状态，另一侧的结构同样也会达到最优状态。索塔位于桥梁对称中心，受力也对称，无需将其设置为优化目标。因此仅需保持主梁平整即可使全桥达到最优成桥状态，这里设置主梁 9 个拉索连接处的竖向位移为优化目标，设置拉索目标位移值为-0.01m。该模型总共由 9 个优化对象，即 9 对预应力索力；9 个优化目标，即 9 对拉索连接点。

设置完成后，既可运行施工阶段的索力优化。荷载优化器基于影响矩阵的原理，在指定优化目标（可以为节点位移、节点反力、结构弯矩等）和优化变量（可以为斜拉索等）后，形成影响矩阵。通过多次迭代计算，调整结构的优化变量，使优化目标值落入收敛误差之内，完成优化，找到符合目标条件的成桥状态。

运行完成后，在工况设置中可以查看优化结果。未优化前初始索力均为-0.001 初始应变荷载，比例系数为 1，优化后每组索力的比例系数将发生改变。如图 3-2 中，2 号拉索的比例系数由 1 变成了 5.2829。优化索力即为比例系数乘以初始索力值，则 2 号拉索的优化索力为 5.2829 的应变荷载。

在显示窗口中，可以依次查看各个阶段的主梁的弯矩变化，核查软件计算的索力值是否满足最优成桥状态的要求。软件最终的成桥状态如图 3-3 所示，由图中可以看出成桥时主梁的弯矩分布较为均匀，各个斜拉索的索力分布如图 3-4 所示，索力分布较为合理。



阶段数据: 8 (0.天; 输出: 2号段; Task(s) 5,6)

阶段操作	对象类型	对象名称	添加龄期	类型	名称	比例系数
Add Structure	Group	<BOBJ1>DECK-2	3.			
Add Structure	Group	<BOBJ1>DECK-2	3.			
Load Objects If Added	Group	<BOBJ1>DECK-2		Load Pattern	DEAD	2.
Add Structure	Group	Cabl-2	0.			
Load Objects If Added	Group	Cabl-2		Load Pattern	张拉	5.2829

图 3-2 优化结果

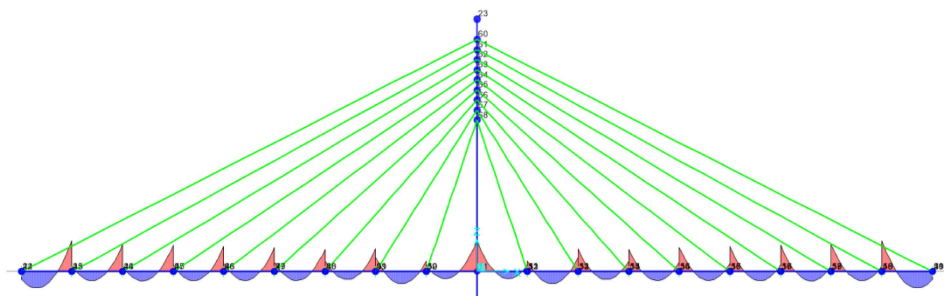


图 3-3 最终成桥状态

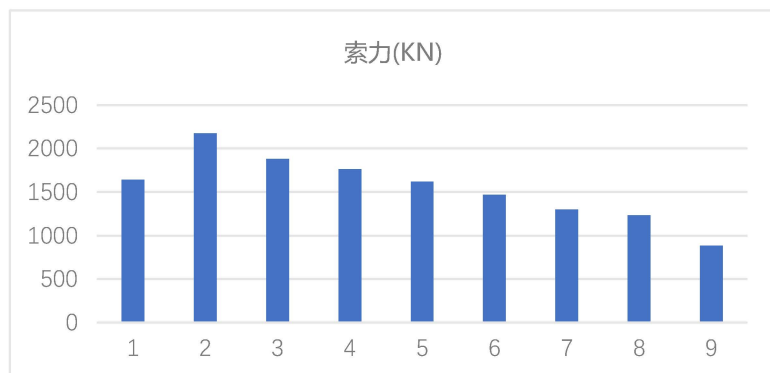


图 3-4 索力分布

4 结语

由上述介绍可知,采用导向结构(Add Guide Structure)功能进行施工阶段分析时,能使新添加节段沿前一施工节段切向方向添加,与斜拉桥施工时保持“梁平”的要求相符。采用导向结构(Add Guide Structure)功能做斜拉桥正装施工的分析时,可结合软件的荷载优化器功能,在考虑结构体系不断变化的条件下,快速帮助工程师找到施工阶段各个斜拉索的合理索力值。