

One Stop Solution
for Bridge and Civil Structures

midas Civil

斜張橋成橋階段 及順施工階段分析

台灣邁達斯 技術部製作 www.midasuser.com.tw

CONTENTS

概要	1
橋梁基本資料	2
載重	2
設定建模環境	3
定義材料和斷面特性	4
成橋階段分析	6
橋梁建模	7
建立主梁模型	8
建立主塔模型	9
建立主索	11
建立主塔支承	12
輸入邊界條件	13
計算初始索拉力	14
輸入載重條件	15
輸入載重	16
運行結構分析	20
查看完工階段分析結果	21
建立載重組合	21
計算未知載重係數	22
查看變形結果	26
順施工階段分析	27
定義順施工階段	30
順施工階段分析	31
順施工階段分析模型	33
定義施工階段	35
定義結構群組	37
定義邊界群組	42
定義載重群組	47
定義指派施工階段	53
輸入施工階段分析資料	59
運行結構分析	60
查看施工階段分析結果	61
查看變形形狀	61
查看彎矩	62
查看軸力	63
查看計算未閉合配合力時的節點位移和內力值	64
成橋階段分析和順施工階段分析結果比較	65

概要

斜張橋(Cable-stayed bridges)將拉索與主梁有效地結合在一起，不僅橋型美觀，且根據所選的索塔形式及拉索的布置可形成各式多樣化的結構型態，其易與周邊環境融合，是符合環境設計理念的橋梁形式之一。

為了決定各施工階段中設置拉索時的張拉力，首先要決定在成橋階段靜載作用下的初始平衡狀態，之後按順序做施工階段分析。

一般進行斜張橋分析時，首先通過逆施工階段分析計算得初始索拉力（Cable Pretension Loads），之後進行順施工階段分析。但若利用 midas Civil 中 **Lack-of-Fit Force** 功能可直接進行順施工階段分析，省略逆施工階段計算索拉力的步驟。

在本例題中將介紹建立斜張橋分析模型的方法、計算拉索初張拉力的方法、採用 **Lack-of-Fit Force 未閉合配合力** 功能利用成橋階段分析張拉力進行順施工階段分析的方法。本例題中的橋梁模型如圖 1 所示，為三跨連續斜張橋，主跨跨度為 110m、邊跨跨度為 40m。

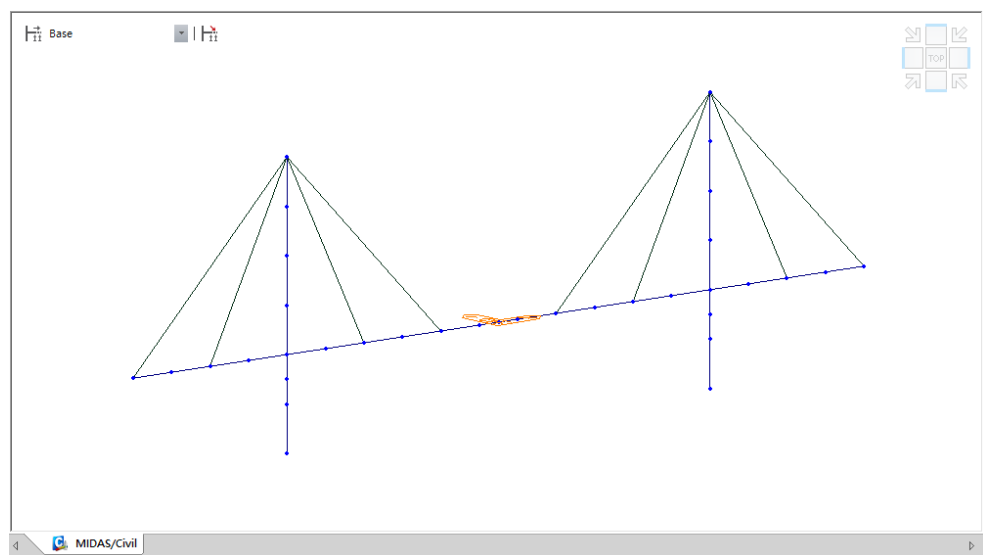


圖 1 斜張橋分析模型

橋梁基本資料

本例題主要在說明斜張橋分析的步驟，因此本例中橋梁採用比較簡單的分析模型，部分假設可能與實際橋梁設計內容不同

本例題橋梁的基本資料如下：

橋梁形式：	三跨連續斜張橋
橋梁全長：	$L = 40\text{ m} + 110\text{ m} + 40\text{ m} = 190\text{ m}$
橋梁高度：	下部主塔高 20；上部主塔高 40 m

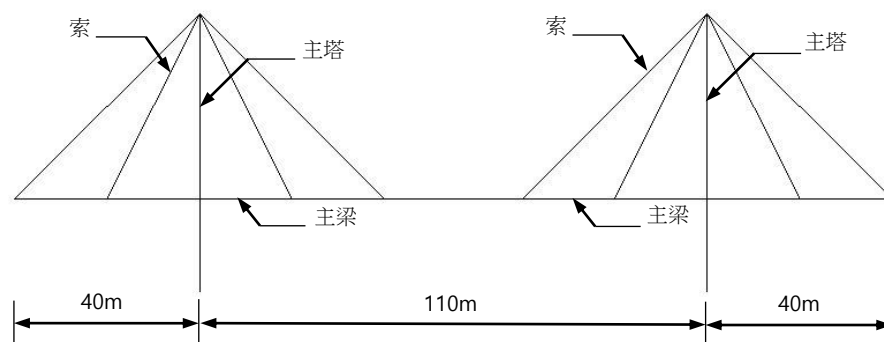


圖 2 橋張橋立面圖

載重

💡 運用 midas Civil 中的索力最佳化功能計算拉索的初拉力。

分類	荷載形式	荷載值
靜載重	Self weight	由程式內部自動計算
索初拉力	Pretension Load	滿足成橋階段初始平衡狀態的索初拉力 ^①
施工工作車	Nodal Load	80 tonf
支承強制位移	Specified Displacement	10 cm

設定建模環境

首先進行斜張橋成橋階段分析，開啟新專案並儲存為‘Cable Stayed Forward’。

將單位系統設定為‘m’和‘tonf’。單位系統可依據輸入的資料類型隨時進行更換。

-  >  **New Project**
-  >  **Save (Cable Stayed Forward)**

Tools 表單 > **Unit System**

Length>m; Force (Mass)>tonf ↵

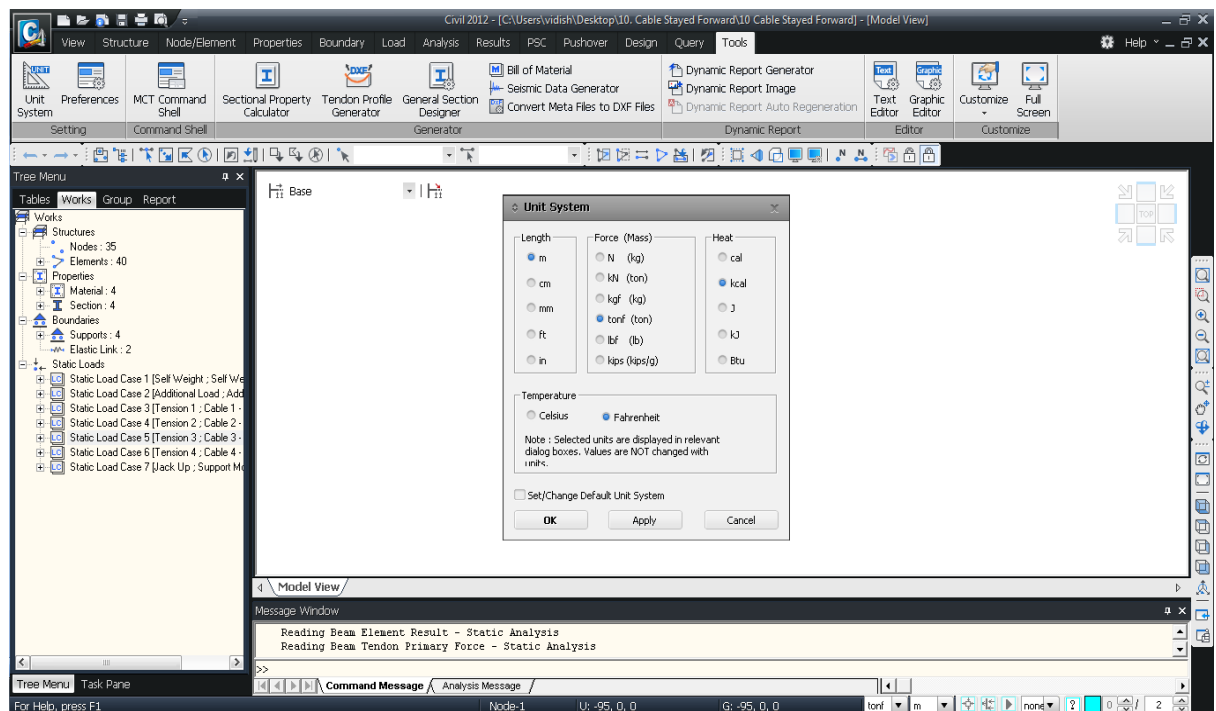


圖 3 設定單位系統

定義材料和斷面特性

輸入加勁主梁、上部主塔、下部主塔、拉索的材料性質資訊。點擊 Properties 對話框中 Material 表單的 **Add** 鍵新增材料資訊。

Properties 表單 >  **Material Properties**

Name (**Girder**) ; Type of Design > **User Defined**

Modulus of Elasticity (**2.1e7**) ; Poisson's Ratio (**0.3**)

Weight Density (**7.85**) ↴

按照上述方法並參照表 1 輸入下部主塔(Lower Tower)、上部主塔(Upper Tower)、拉索(Cable)等的材料特性值。

表 1 材料特性值

ID	Component	Modulus of Elasticity (tonf/m ²)	Poisson's Ratio	Weight Density (tonf/m ³)
1	Girder	2.1×10^7	0.3	7.85
2	Lower Tower	2.5×10^6	0.17	2.5
3	Upper Tower	2.1×10^7	0.3	7.85
4	Cable	1.57×10^7	0.3	7.85

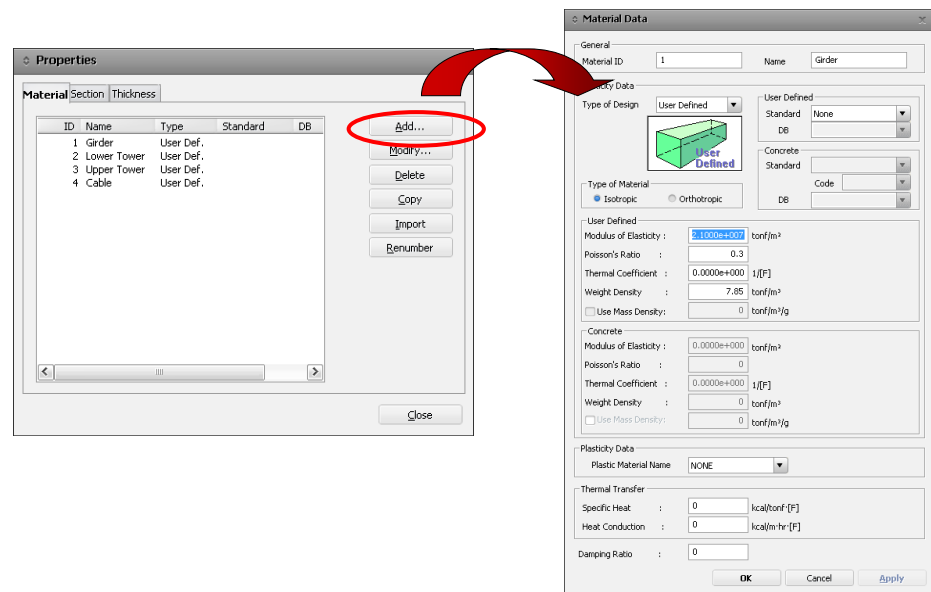


圖 4 定義材料性質

輸入加勁主梁、上部主塔、下部主塔、拉索的斷面性質資訊。點擊 Properties 對話框中 Section 表單的 **Add** 鍵新增斷面資訊。

Properties 表單 >  **Section Properties**

Value 表單

Section ID (1) ; Name (Girder)

Section Shape > **Solid Rectangle** ; Stiffness > Area (0.8) ↵

按照上述方法並參照表 2 輸入下部主塔(Lower Tower)、上部主塔(Upper Tower)、拉索(Cable)等的斷面性質。

表 2 斷面性質

ID	Name	Area (m ²)	Ixx (m ⁴)	Iyy (m ⁴)	Izz (m ⁴)
1	Girder	0.8	15.0	1.0	15.0
2	Lower Tower	50.0	1000.0	500.0	500.0
3	Upper Tower	0.3	5.0	5.0	5.0
4	Cable	0.005	0.0	0.0	0.0

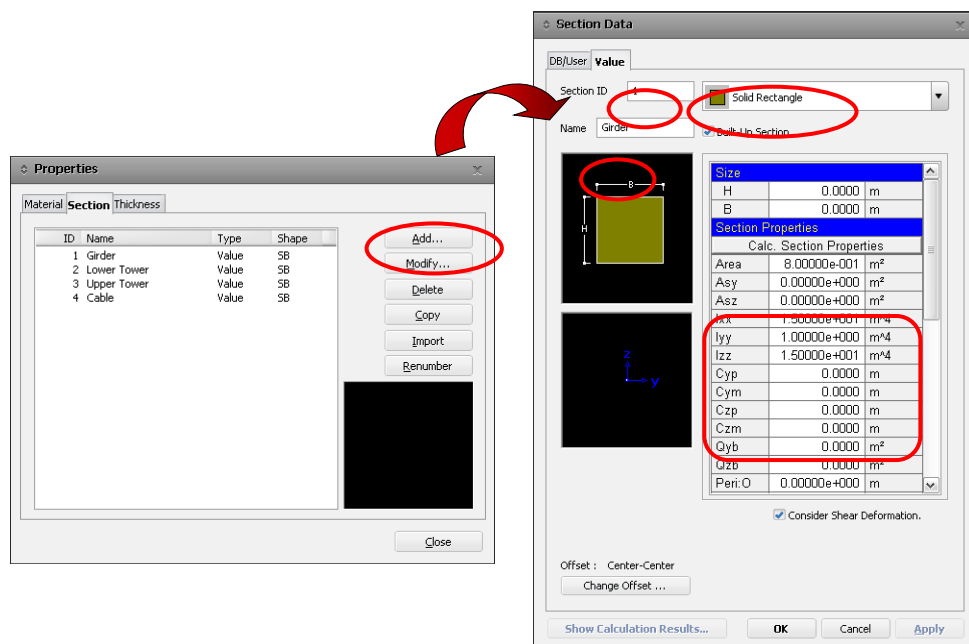


圖 5 定義斷面性質

成橋階段分析

本例在建立斜張橋完工階段(Final State)模型後，接著將計算由自重和外加靜載重所引起的初始索拉力，以初始索拉力(Initial Prestress Forces)進行成橋階段的**初始平衡狀態分析**(Initial Equilibrium State Analysis)。

首先建立二維斜張橋分析模型，成橋階段的初始索拉力可透過 **Unknown Load Factor** 功能與最佳化法則求得。

斜張橋的成橋階段模型如圖 6 所示。

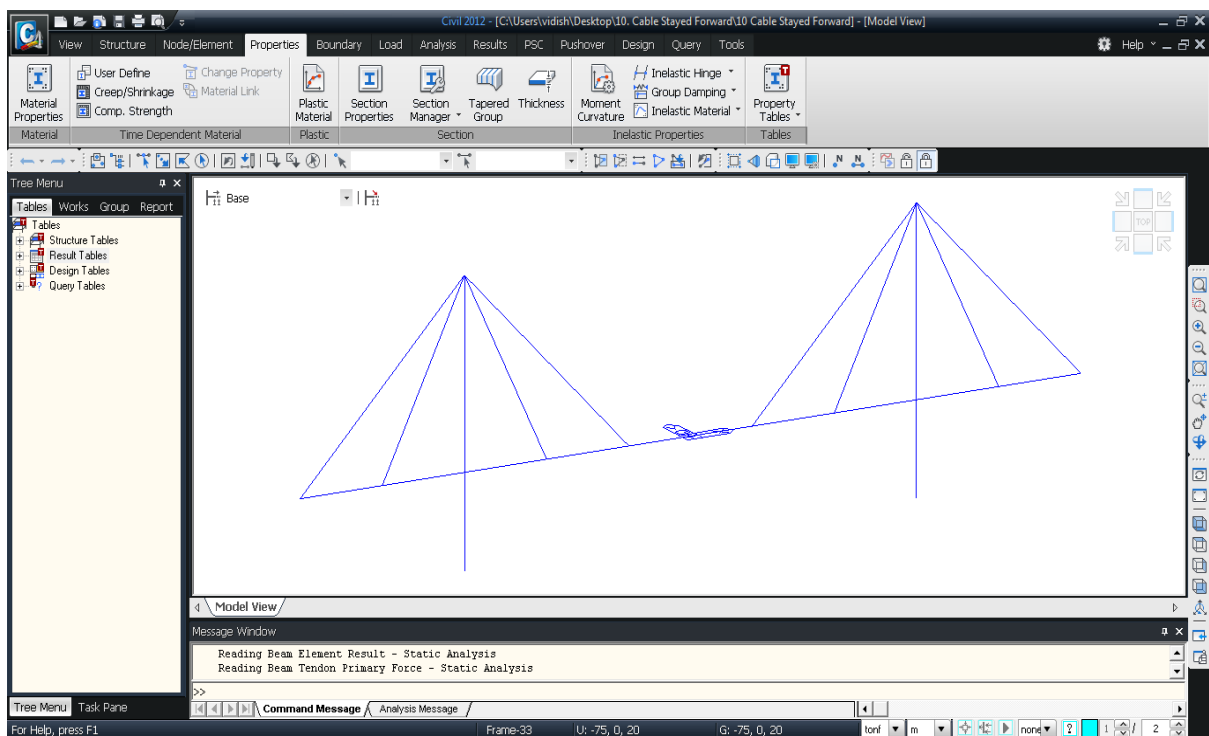


圖 6 斜張橋成橋階段模型

橋梁建模

本例題中建立斜張橋模型的步驟是先建立成橋階段的分析模型，之後進行成橋階段分析，最後另存檔做施工階段分析。

斜張橋成橋階段模型建立的詳細步驟如下：

-
1. 建立加勁主梁模型
 2. 建立主塔模型
 3. 建立拉索模型
 4. 生成主索塔上的支承
 5. 輸入邊界條件
 6. 由Unknown Load Factors 計算初始索拉力
 7. 輸入載重狀況及荷載條
 8. 運行結構分析
 9. 計算未知載重係數
-

建立主梁模型

首先建立起始節點後利用 **Extrude Element** 擴展單元功能生成主梁，主梁單元規劃(9@10+2@5+9@10m)。

 **Front View**,  **Node Snap** (on),  **Element Snap** (on)

 **Auto Fitting** (on),  **Node Number** (on)

Node /Element >  **Create Nodes**

Coordinates (**-95, 0, 0**) ↵

Nodes /Elements >  **Extrude Elements**

 **Select All**

Extrude Type>**Node→Line Element**

Element Attribute>Element Type>**Beam**

Material>**1 : Girder** ; Section>**1 : Girder**

Generation Type>**Translate**

Translation>**Unequal Distance** ; Axis>**x**

Distances>**9@10, 2@5, 9@10** ↵

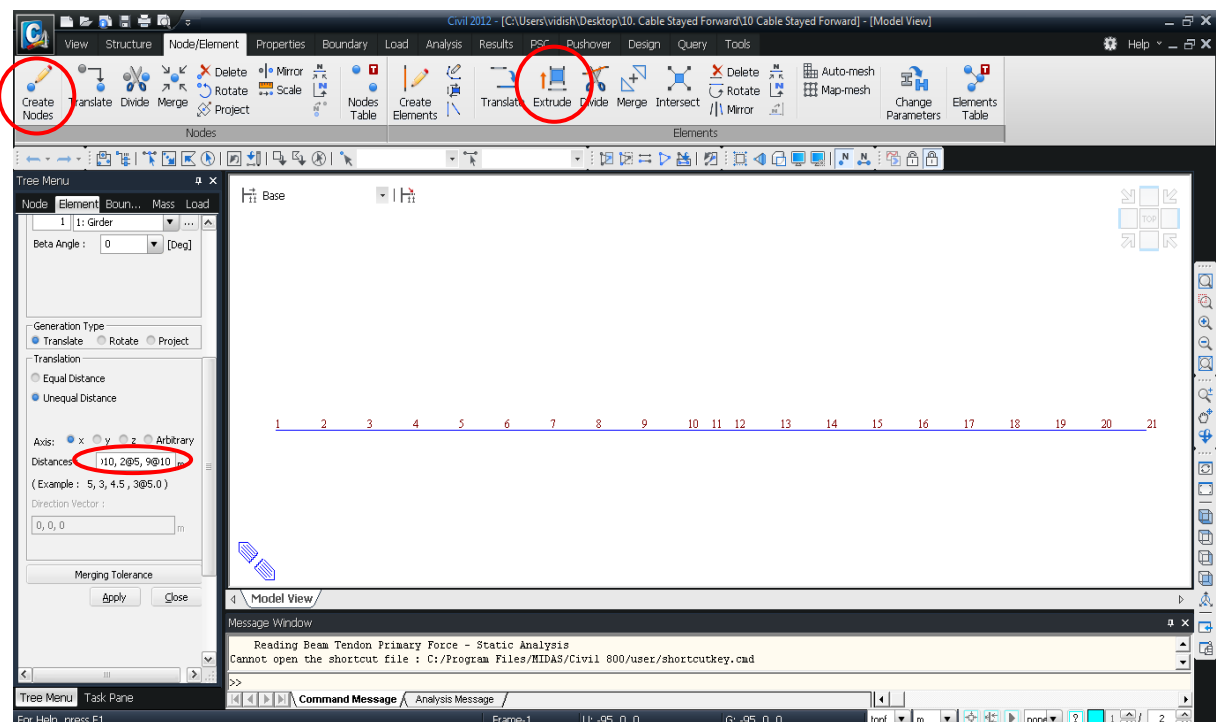


圖 7 建立主梁單元

建立主塔模型

首先建立主塔下端部節點後，利用 **Extrude Element** 擴展單元功能建立主塔下部梁單元，主塔單元規劃(10m+5m)。

- Node /Element>  **Create Nodes**
 Coordinates **(-55 , 0, -20)**
 Copy>Number of Times **(1)** ; Distance **(110, 0, 0)** ↵
- Node /Element >  **Extrude Elements**
 **Select Window** (Nodes : 圖 8 ① ; Node 22, 23)
 Extrude Type>**Node→Line Element**
 Element Attribute>Element Type>**Beam**
 Material>**2 : Lower Tower** ; Section>**2 : Lower Tower**
 Generation Type>**Translate**
 Translation>**Unequal Distance** ; Axis>**z**
 Distances>**10, 5** ↵

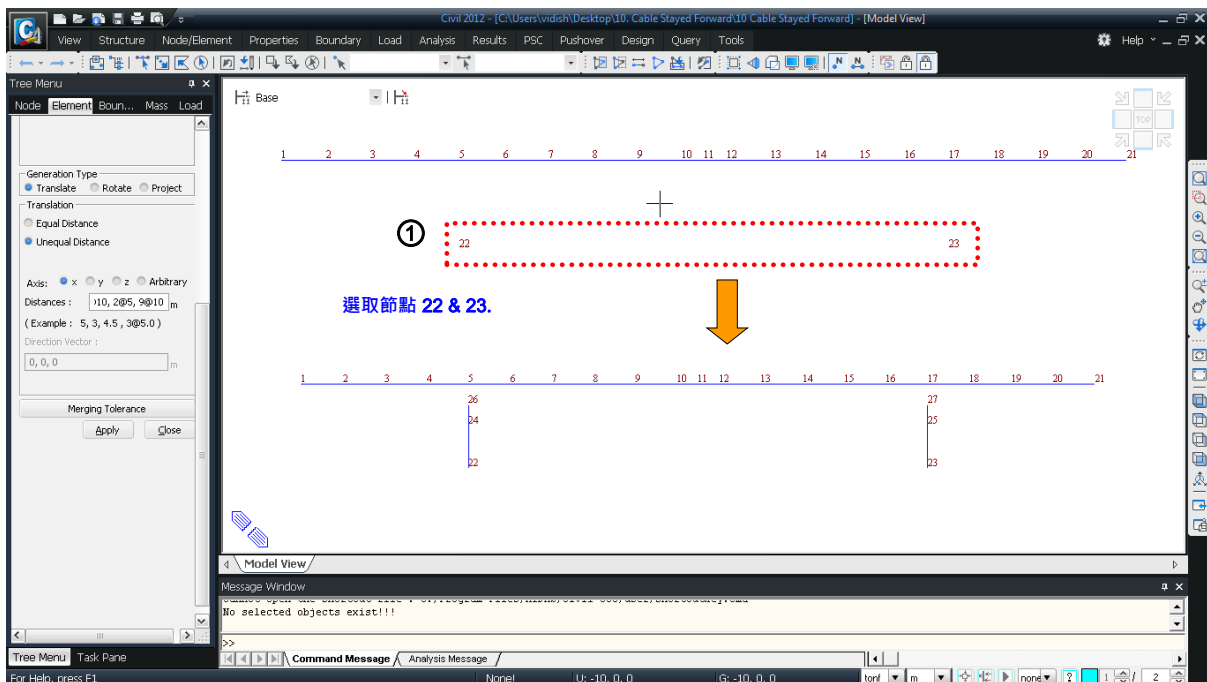


圖 8 建立下部主塔單元

同前方法，利用 **Extrude Element** 擴展單元功能建立主塔上部梁單元，主塔單元規劃 (10m+5m+3@10m)。

Node /Element >  **Extrude Elements**

 **Select Window** (Nodes : 圖 9 ① ; Node 26, 27)

Extrude Type>**Node→Line Element**

Element Attribute>Element Type>**Beam**

Material>**3 : Upper Tower** ; Section>**3 : Upper Tower**

Generation Type>**Translate**

Translation>**Unequal Distance** ; Axis>**z**

Distances>**15, 3@10** ↵

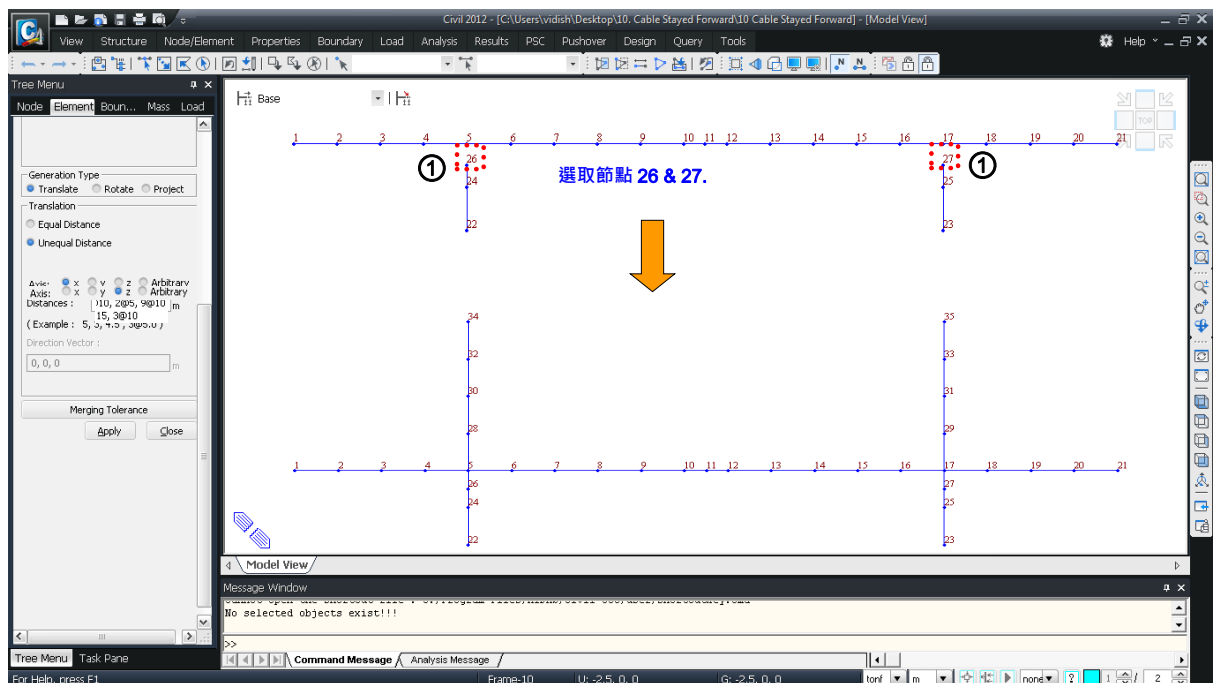
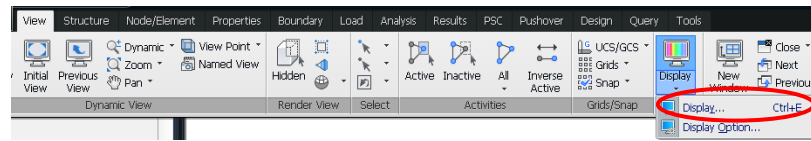


圖 9 建立上部主塔單元

建立主索

利用 **Create Element** 功能建立主索單元，並同時確認主索的單元座標系。



Element > **Local Axis** (on) ↵

Node /Element > **Create Elements**

Element Type > **Truss**

Material > **4: Cable** ; Section > **4: Cable**; Beta Angle (**0**)

Nodal Connectivity (**34, 1**) ↵ ; Nodal Connectivity (**34, 3**) ↵

Nodal Connectivity (**34, 7**) ↵ ; Nodal Connectivity (**34, 9**) ↵

Nodal Connectivity (**35, 13**) ↵ ; Nodal Connectivity (**35, 15**) ↵

Nodal Connectivity (**35, 19**) ↵ ; Nodal Connectivity (**35, 21**) ↵

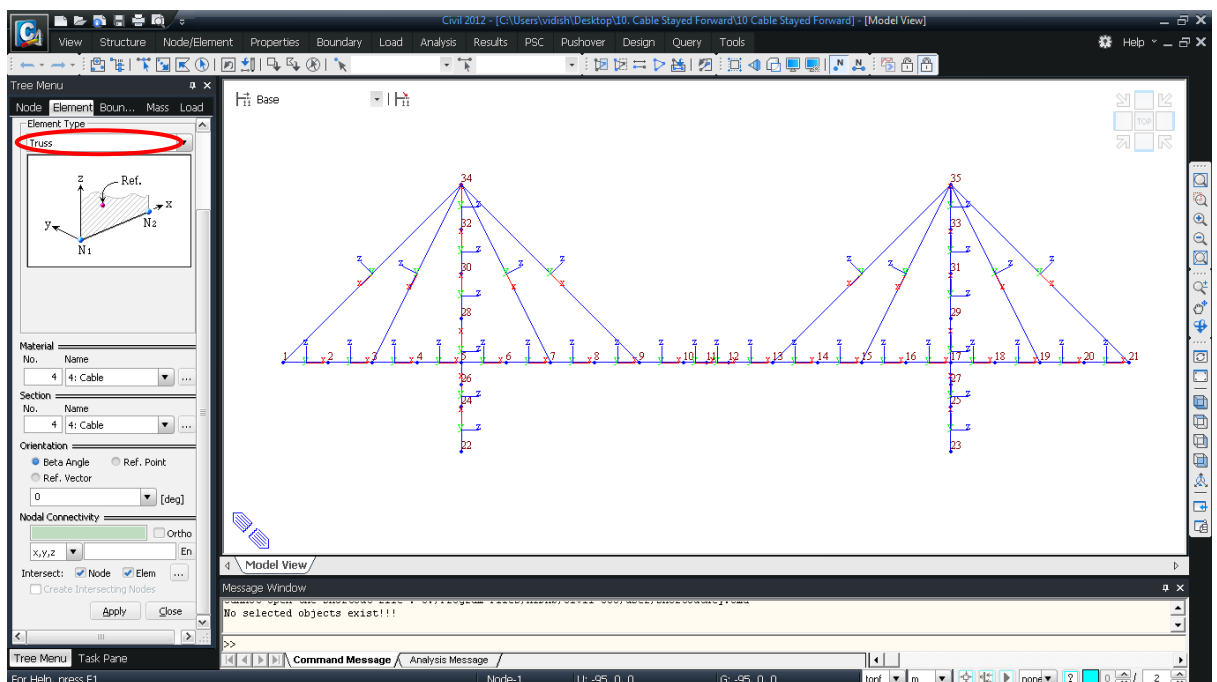


圖 10 建立主索單元

建立主塔支承

使用 **Elastic Link** 彈性連桿功能建立主塔上的支承。

支承條件如下：

SDx: 500,000 tonf/m
SDy: 100,000,000 tonf/m
SDz: 1,000 tonf/m

Boundaries 表單 > **Elastic Link**

 **Zoom Window** (圖 11 ①)

Options > **Add** ; Link Type > **General Type**

SDx (tonf/m) (**500000**) ; SDy(tonf/m) (**100000000**) ; SDz(tonf/m) (**1000**)

Shear Spring Location (on)

Distance Ratio From End I : SDy (**1**) ; SDz (**1**)

Beta Angle > (**0**)

2 Nodes (**26,5**)

2 Nodes (**27,17**) ↵

🔊 彈性連接單元軸向勁度輸入單元長度所施加的力，旋轉勁度輸入單位轉角所施加的彎矩值。

🔊 Beta Angle 調整彈性連接單元的布置方向。

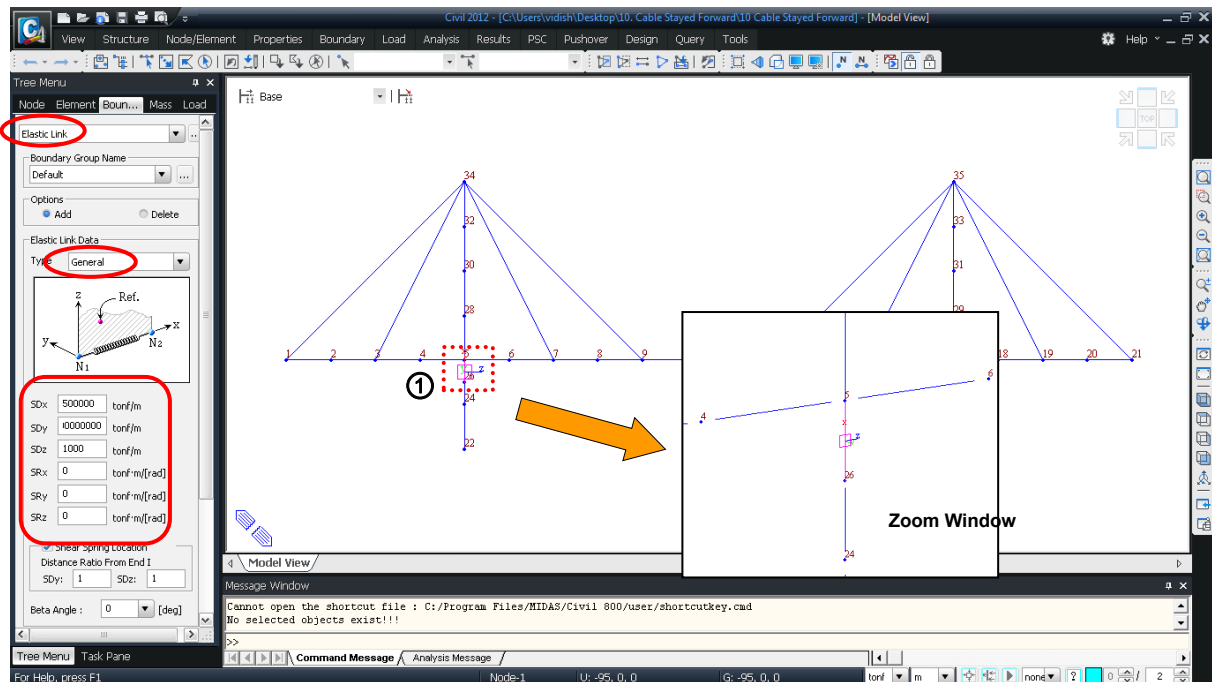


圖 11 建立主塔支承

輸入邊界條件

分析模型的邊界條件如下。

- 主塔底部：固定端 (Dx, Dy, Dz, Rx, Ry, Rz)
- 橋台：鉸支承 (Dy, Dz, Rx, Rz)

輸入主塔底部與橋台處的邊界條件。



Auto Fitting

Boundary 表單 > **Supports**

Select Window (Nodes : 圖 12 ① ; Node 22, 23)

Boundary Group Name > **Default**

Options > **Add** ; Support Type > **D-ALL , R-ALL** ↵

Select Window (Nodes : 圖 12 ② ; Node 1, 21)

Boundary Group Name > **Default**

Options > **Add** ; Support Type > **Dy, Dz, Rx, Rz** ↵

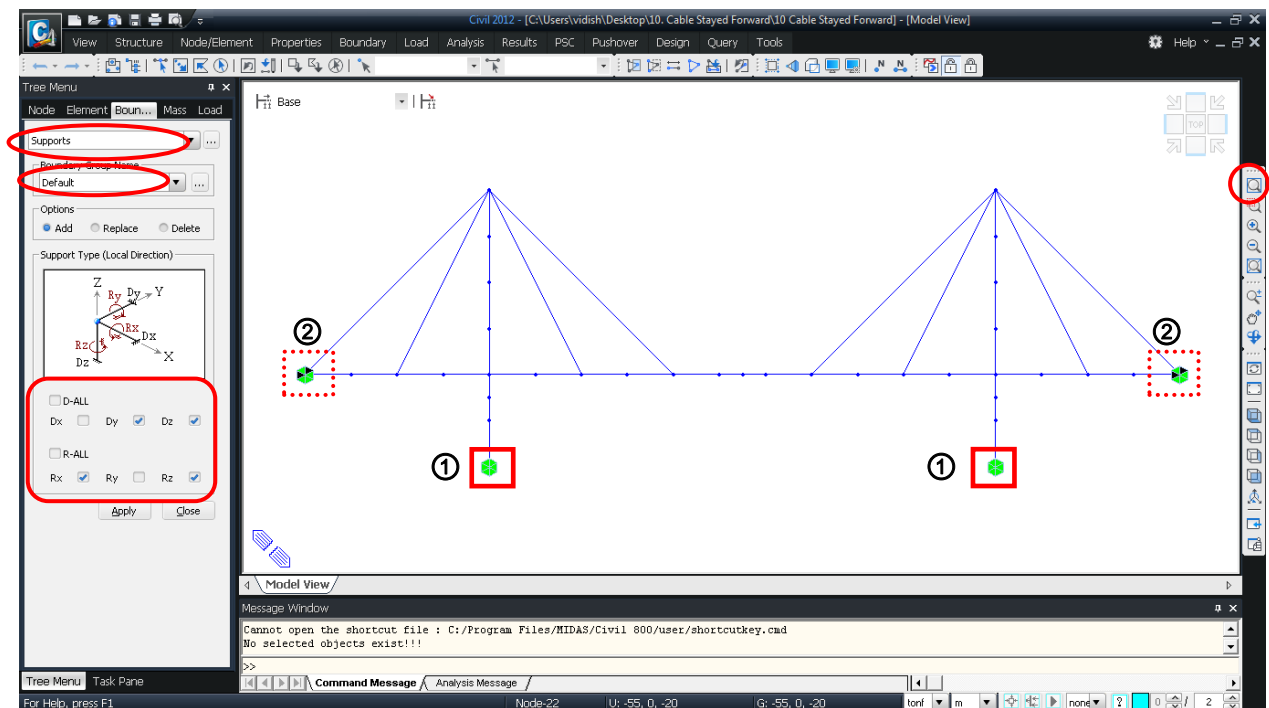


圖 12 定義邊界條件

計算初始索拉力

為了改善斜張橋成橋階段主梁、索塔、拉索及支承的受力狀態，將拉索施加一定的初始拉力，始之與結構自重平衡。

因為斜張橋是高次靜不定結構，計算拉索的初始拉力需要多次的反覆計算，且因各拉索的張拉力並非只有唯一的解，因此對於同一個斜張橋而言，若由不同工程師設計將會得出不同的初始索拉力。

midas Civil 提供的 **Unknown Load Factor** 未知載重係數功能使用了最佳化法則，可計算出滿足指定約束條件下的結構最佳載重係數，運用在計算斜張橋拉索的初始拉力時非常有效。

使用 **Unknown Load Factor** 未知載重係數功能計算斜張橋初始索拉力的步驟參見表 3。

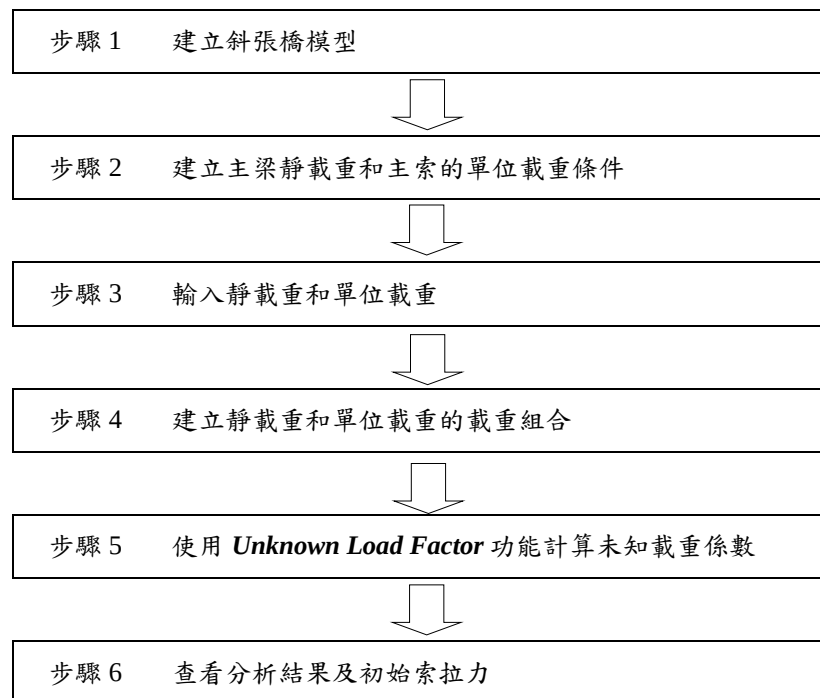


表 3. 計算初始索拉力流程圖

輸入載重條件

為了計算由靜載重引起的初始索拉力，輸入自重、附加靜載重、主索的單位初拉力等載重條件。

本例題中的斜張橋為主塔兩側各有 4 根的吊索的對稱結構，需要的未知載重係數為 4 個，定義 4 個初拉力單位載重。

輸入對應的載重狀況。

💡 使用 MCT 命令視窗輸入荷載條件會更方便。
MCT Command Shell 中利用指令 *STLDCASE 輸入資料，按 RUN 加入。

Load 表單 > *Static Load Cases*

Name (**Self Weight**); Type>**Dead Load** 💡

Description (**Self Weight**) ↵

Name (**Additional Load**); Type>**Dead Load**

Description (**Additional Load**) ↵

Name (**Tension 1**); Type>**User Defined Load**

Description (**Cable1- UNIT PRETENSION**) ↵

...

Name (**Tension 4**); Type>**User Defined Load**

Description (**Cable4- UNIT PRETENSION**) ↵

Name (**Jack Up**); Type>**User Defined Load**

Description (**)** ↵

輸入重狀況名稱 (**Tension 1**) 到 (**Tension 4**)。

No	Name	Type	Description
1	Self Weight	Dead Load (D)	Self Weight
2	Additional L	Dead Load (D)	Additional Load
3	Tension 1	User Defined Load (USER)	Cable 1 - Unit Pretension
4	Tension 2	User Defined Load (USER)	Cable 2 - Unit Pretension
5	Tension 3	User Defined Load (USER)	Cable 3 - Unit Pretension
6	Tension 4	User Defined Load (USER)	Cable 4 - Unit Pretension
7	Jack Up	User Defined Load (USER)	Support Movement
*			

圖 18 建立靜載重及單位載重狀況

輸入載重

輸入結構自重、作用於主梁的附加靜載重、拉索的單位初始張拉載重、支承強制位移載重。

利用 **SelfWeight** 功能輸入結構自重。附加靜載重包括護牆、欄杆與橋面鋪裝載重等。為了計算主索初拉力輸入主索的單位初拉力載重。

首先使用 **SelfWeight** 功能輸入結構自重。

Zoom Fit

Load 表單 > **Self Weight**

Load Case Name > **Self Weight**

Load Group Name > **Default**

Self Weight Factor > **Z (-1)** ↵

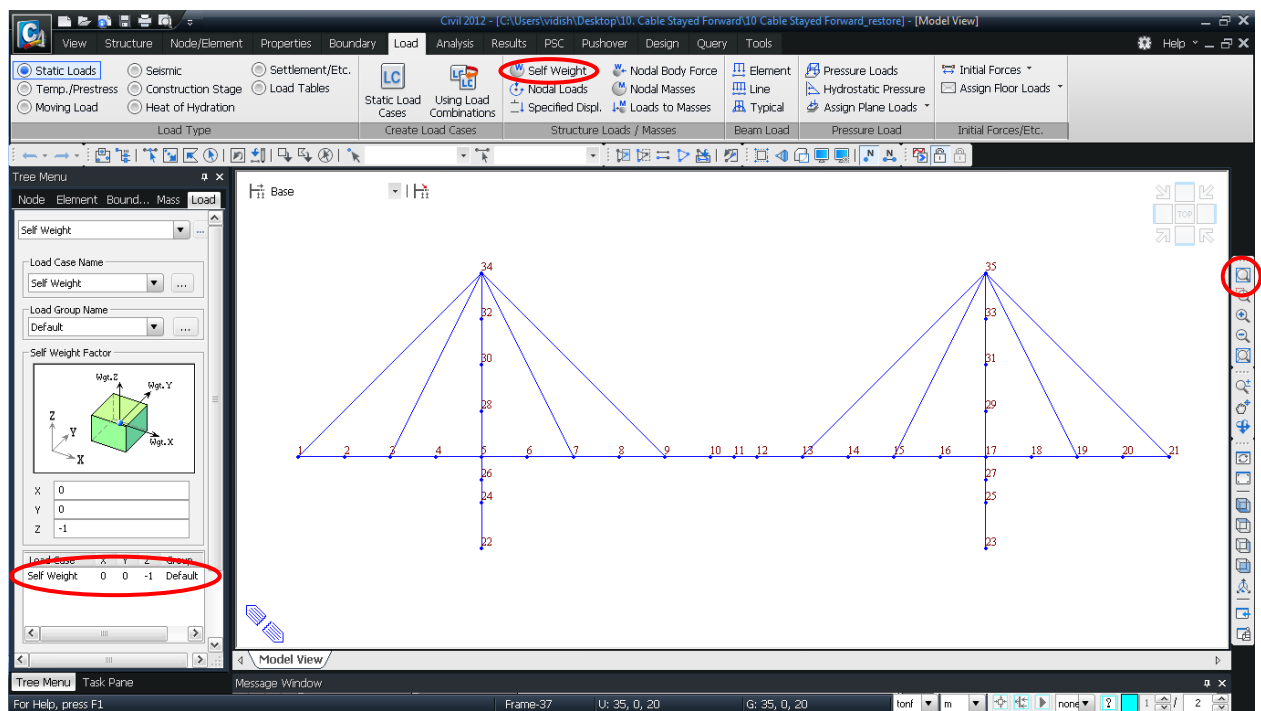


圖 19 輸入自重

輸入作用於主梁上的附加靜載重。由於主梁模型為兩個三跨連續梁，故將附加靜載重等分作用於主梁上。

使用 **Element Beam Loads** 梁單元載重功能輸入護牆、欄杆與橋面鋪裝載重，載重大小為 -3.0 kN/m 。

Load 表單 > *Element*

 **Select Window** (Nodes : 圖 20 ① ; Node 22, 23)

Load Case Name>Additional Load ; Options>Add

Load Type>**Uniform Loads**; Direction>**Global Z**

Projection>**No**

Value>**Relative**; x1 (0), x2 (1), W (-3) ↵

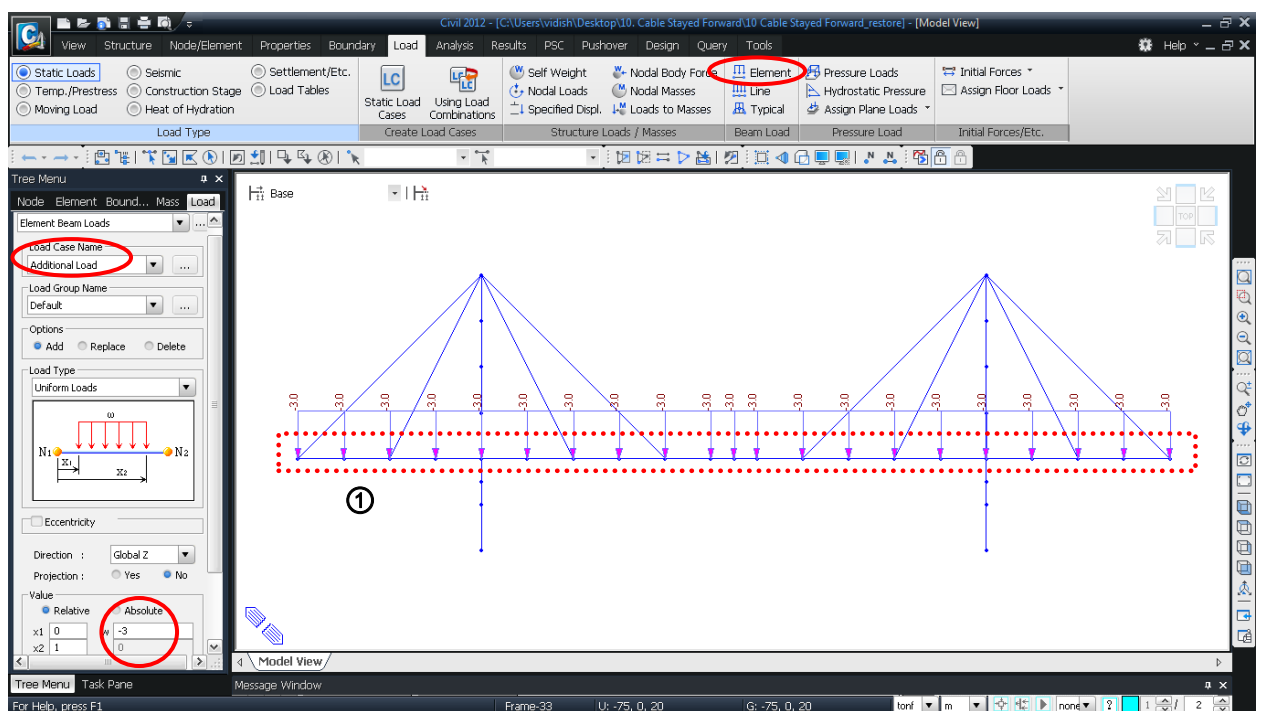


圖 20 輸入作用於主梁上的附加靜載重

輸入索單元的單位初拉力。以橋梁中央為對稱軸賦予兩側相同的單位初拉力，且對稱的主索設置於相同的載重狀況內。

Load 表單 > Temp./ Prestress Option > **Pretension Loads**

View 表單 > Select Section >  **Select Intersect** (Elements: 圖 21 ① ; **Element : 33, 40**)

Load Case Name>**Tension 1**; Load Group Name>**Default**

Options>**Add**; Pretension Load (1) ↵

...

Load Case Name>**Tension 4**; Load Group Name>**Default**

Options>**Add**; Pretension Load (1) ↵

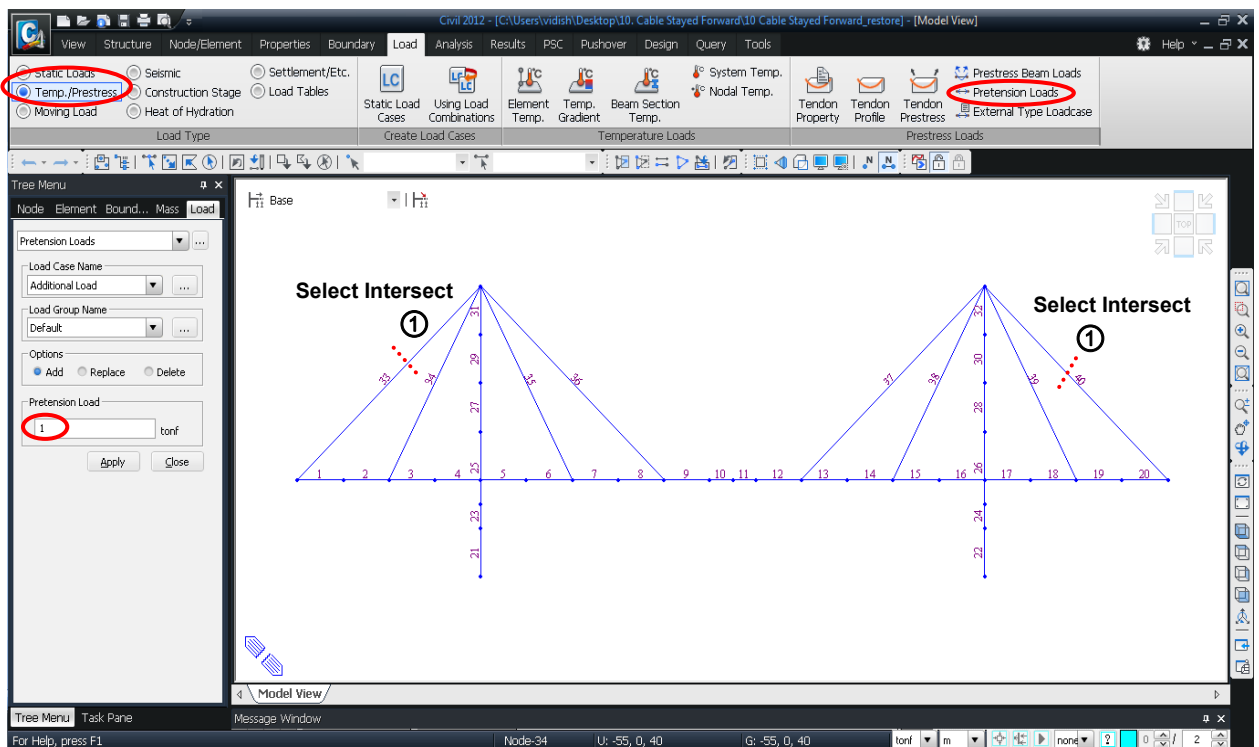


圖 21 輸入主索的單位初拉力

參照表 4 輸入 Tension 2 ~ Tension 4 的拉索單位初拉力。此時也可用 MCT Command Shell 指令視窗輸入會更方便一些。

表 4. 載重狀況與單元編號

Load Case	Element No.	Load Case	Element No.
Tension 1	33, 40	Tension 3	35, 38
Tension 2	34, 39	Tension 4	36, 37

利用 **Display** 功能查看已輸入的拉索單位初拉力。

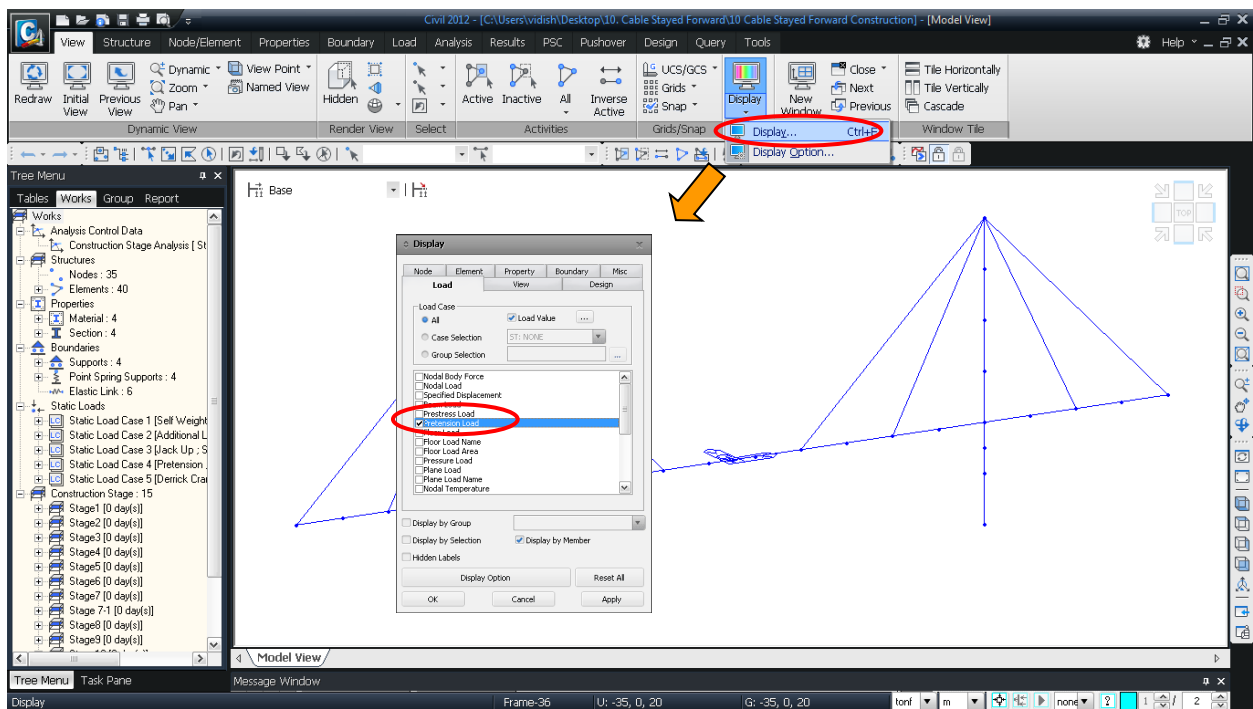


圖 22 查看已輸入索單元初拉力

利用 *Specified Displacements of Supports* 支承強制位移功能輸入邊跨支承的支承強制位移載重。

支承強制位移載重如下：

豎向垂直位移： 0.01 m

Load 表單 > *Specified Displacements of Supports*

 Select Window (Nodes : 圖 23 ① ; Node 1, 21)

Load Case Name > **Jack Up** ; Options > **Add**

Displacements > **Dz (0.01)** ↵

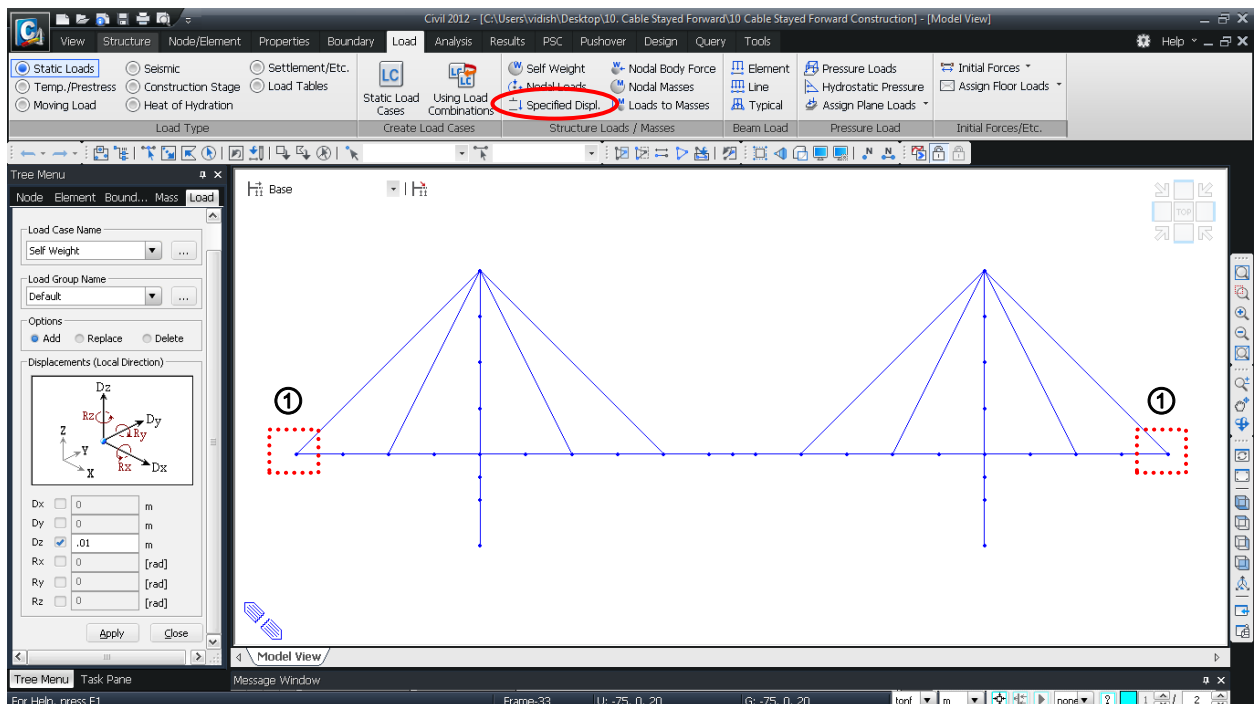


圖 23 支承強制位移載重

運行結構分析

運行結構自重、外加靜載重、主索單位初拉力、支承強制位移載重的靜力分析。

Analysis /  **Perform Analysis** ↵

查看完工階段分析結果

建立載重組合

以結構自重、附加靜載重、主索的單位初拉力（4 個載重狀況）及支承強制位移等載重條件建立載種組合。

Results 表單 / *Load Combination*

Load Combination List>Name>**LCB 1**

Active>**Active** ; Type>**Add**

LoadCase>**Self Weight (ST)**; Factor (**1.0**)

LoadCase>**Additional Load (ST)**; Factor (**1.0**)

LoadCase>**Tension 1(ST)**; Factor (**1.0**)

LoadCase>**Tension 2(ST)**; Factor (**1.0**)

LoadCase>**Tension 3(ST)**; Factor (**1.0**)

LoadCase>**Tension 4(ST)**; Factor (**1.0**)

LoadCase > **Jack Up (ST)** ; Factor (**1.0**) ↵

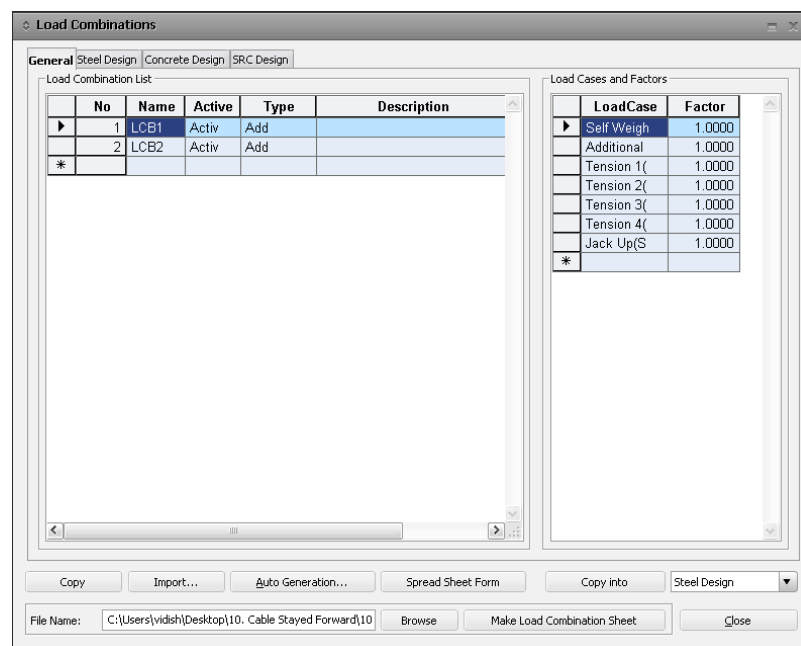


圖 24 建立載重組合

計算未知載重係數

計算載重組合 LCB1 作用下滿足指定約束條件的 **Unknown Load Factor** 未知載重係數。約束條件設定為約束索塔塔頂水平方向的位移(Dx)及加勁主梁的彎矩(My)。

在 **Unknown Load Factor** 功能對話視窗中輸入載重條件、約束條件、構成目標函數的方法等參數。

首先將拉索的單位初拉力載重條件設定為 Unknown 未知載重。

Results 表單 /Cable Control / **Unknown Load Factor**

Unknown Load Factor Group > Add New

Item Name (**Unknown**); Load Comb > **LCB 1**

Object function type > **Square**; Sign of unknowns > **Both**

LCase > **Tension 1** (on)

LCase > **Tension 2** (on)

LCase > **Tension 3** (on)

LCase > **Tension 4** (on)

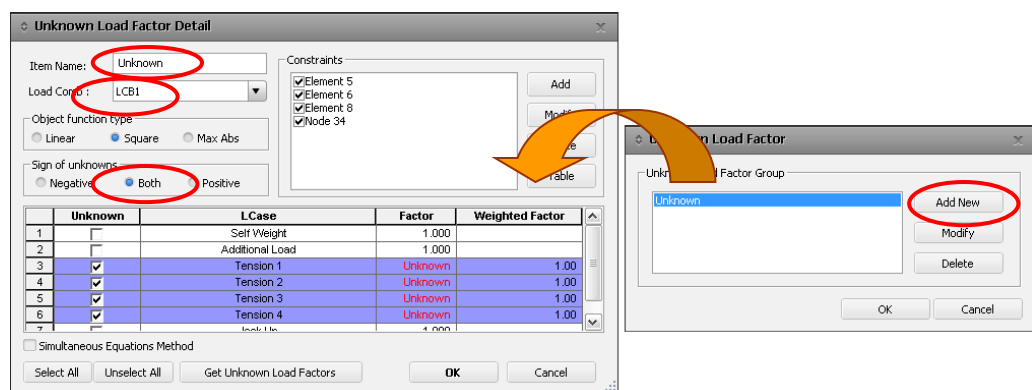


圖 25 Unknown Load Factor 對話視窗

在 **Constraints** 功能中輸入約束條件約束索塔塔頂水平方向的位移(Dx)及控制加勁主梁的彎矩(My)等約束條件。

🔊 本範例中以主塔的水平位移和主梁彎矩作為約束條件，由於分析模型為對稱，只需要設定左半部分的約束即可。

Constraints >
 Constraint Name **(Node 34)**
 Constraint Type > **Displacement**
 Node ID **(34)** 🔊
 Component > **Dx**
 Equality/Inequality Condition > **Equality** ;
 Value **(0)** ↴

Constraints >
 Constraint Name **(Element 5)**
 Constraint Type > **Beam Force**
 Element ID **(5)** 🔊
 Point > I-end
 Component > **My**
 Equality/Inequality Condition > **Equality** ;
 Value **(-300)** ↴

Constraints >
 Constraint Name **(Element 6)**
 Constraint Type > **Beam Force**
 Element ID **(6)** 🔊
 Point > J-end
 Component > **My**
 Equality/Inequality Condition > **Equality** ;
 Value **(-200)** ↴

Constraints >
 Constraint Name **(Element 8)**
 Constraint Type > **Beam Force**
 Element ID **(8)** 🔊
 Point > J-end
 Component > **My**
 Equality/Inequality Condition > **Equality** ;
 Value **(-400)** ↴

可使用 MCT 命令視窗輸入計算未知載重係數的約束條件。MCT Command Shell 中利用指令 *UNKCONS 輸入資料，按 RUN 加入。

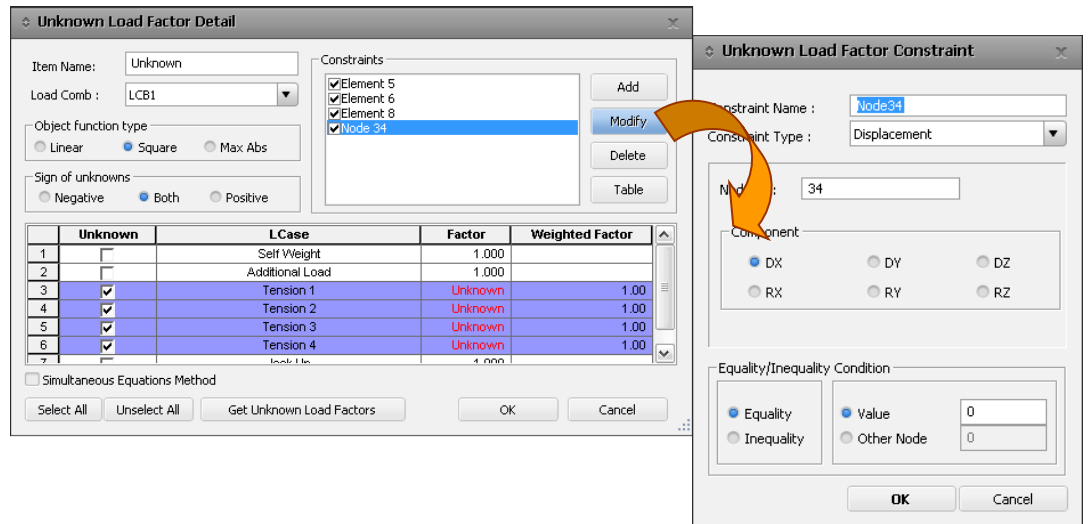


圖 26 約束條件對話視窗

關於未知載重係數計算的詳細說明請參考分析手冊。

在 **Unknown Load Factor Result** 中查看約束條件以及對應的未知載重係數 (Unknown Load Factor)。

Unknown Load Factor Group> Get Unknown Load Factors !

圖 27 為使用 **Unknown Load Factor** 未知載重係數功能計算的未知載重係數結果。

未知載重係數 (主索初拉力)

	Self Weight	Additional Load	Tension 1	Tension 2	Tension 3	Tension 4	Jack Up
Factor	1.000	1.000	333.808	254.370	193.011	340.835	1.000
Constraint	Element 5	Element 6	Element 8	Node 34			
Value	-300.000	-200.000	-400.000	-0.000			
Upper Bound							
Lower Bound							

① Make Load Combination ② Generate Excel File

圖 27 Unknown Load Factors 分析結果

利用計算之未知載重係數建立新的載重組合，按 **Make Load Combination** (圖 27 ①)，查看新的載重組合之分析結果是否滿足約束條件。或按 **Generate Excel File** (圖 27 ②)將結果另儲存為 Excel 格式檔案。

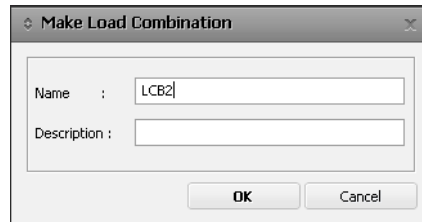


圖 28 使用 Unknown Load Factors 建立 LCB2 載重組合

Results 表單 / Load Combinations

參照圖 27 中 **Unknown Load Factor** 未知載重係數的分析結果，如圖 29 所示建立含 Tension 1 (ST) 到 Tension 4 (ST)未知係數的 LCB2 的載重組合。

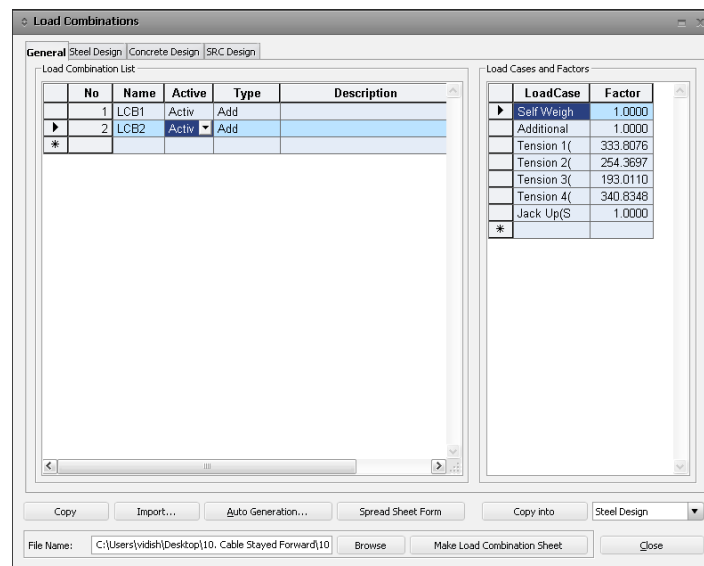


圖 29 使用 Unknown Load Factors 自重生成的載重組合

查看變形結果

查看初始索拉力、結構自重及外加靜載重、支承強制位移載重同時作用下的成橋階段之位移結果。

Results 表單 / Deformations /  **Deformed Shape**

Load Cases/Combinations > **CB:LCB 2**

Components > **DXYZ**

Type of Display > **Values (on); Legend (on)**

Values  > Value Output Details

Decimal Points > **(4)** ; **MinMax Only (on)** ; **Min & Max (on)** ↵

Deform  > Deformation Scale Factor **(0.5)** ↵

 **Zoom Window**

🔊 程式預設的變形顯示比例係數較大時，使用者可調整顯示係數。

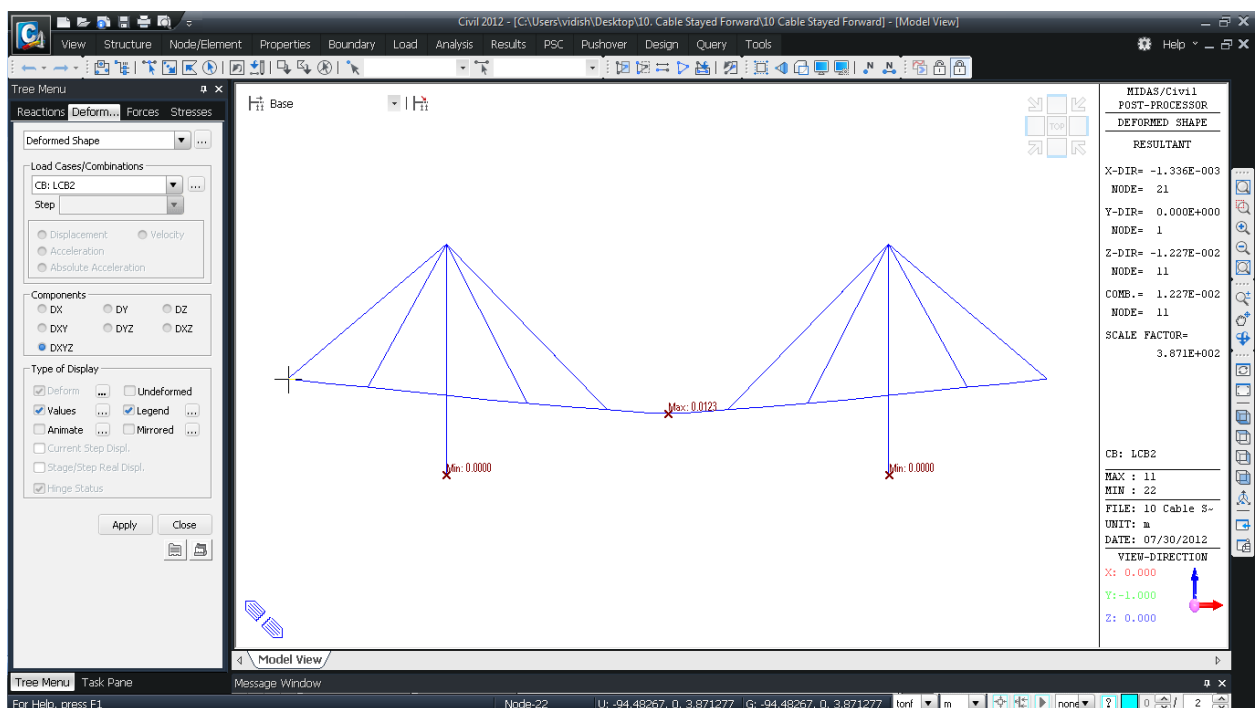


圖 30 查看變形形狀

順施工階段分析

一般通過斜張橋的成橋階段分析計算結構的尺寸和拉索的斷面以及初拉力。

斜張橋的設計除了成橋階段的分析，還需進行施工階段分析。根據施工方案的不同，斜張橋的結構體系會發生很大的變化，且施工中的結構體系有可能比成橋階段更不穩定，所以應對各施工階段進行準確的分析。按施工順序做的施工階段分析稱為順施工階段分析（Forward Construction Stage Analysis）。通過順施工階段分析驗算施工中產生的應力、檢查施工順序、可施工性等，找出最佳的施工方法。

斜張橋順施工階段分析較困難的部分是如何計算出拉索的施工控制張力。midas Civil 可以利用未閉合配合力（Lack of Fit Force）功能，準確計算主索初拉力。

為了進行施工階段的分析，應將加勁主梁、主索、主索錨固點、邊界條件、載重條件等變化程序定義為施工階段。

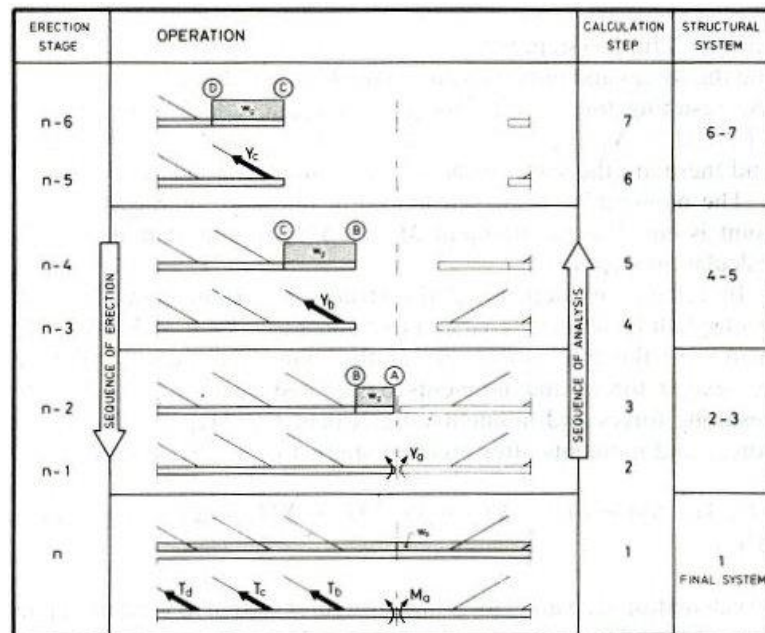
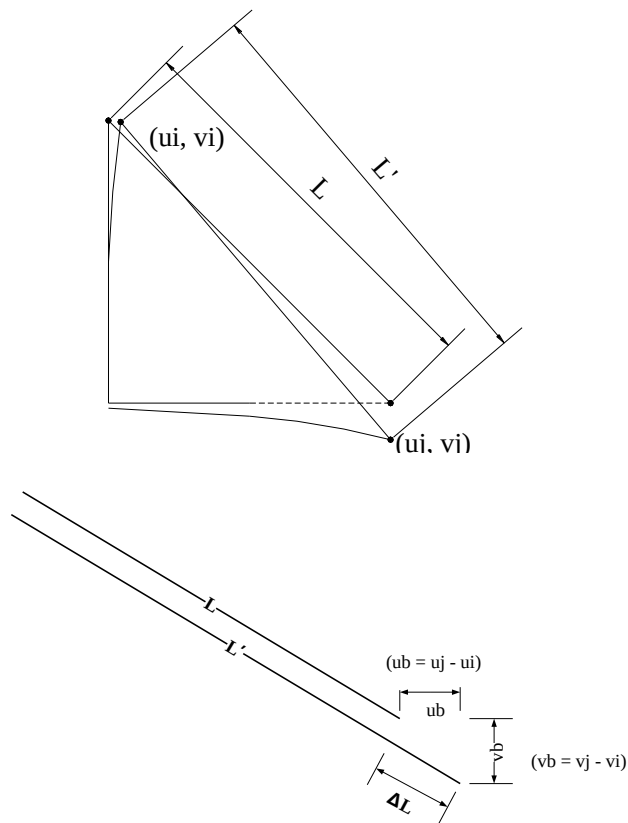


圖 31 斜張橋的施工順序

(1) 主索未閉合配合力的計算-Truss

首先，在安裝主索的前一階段，求出主索兩端節點的位移。程式利用主索兩端的位移，求主索變形前長度(L)與變形後長度(L')之差。根據差值求出相應的主索附加初拉力(Additional Cable Pretension, ΔT)，將求出的附加初拉力(ΔT)和初始平衡狀態分析時計算得出的初拉力(T)疊加，作為施工階段的控制張力進行順施工階段分析。



$$L' - L = \Delta L = Vb \cos \theta + Ub \sin \theta$$

$$\Delta T = \frac{EA}{L} \Delta L$$

$$T_f = T_i + \Delta T$$

圖 32 Lack of Fit Force 計算-Truss

(2) 合攏段未閉合配合力的計算-Beam

三跨連續斜張橋的中間閉合段合攏時，中跨的懸臂偏轉現象，若在此狀態下閉合段進行合攏，則在閉合段不會產生任何內力（僅有構件因自重引起的內力），所以閉合段與兩側相連的橋梁懸臂端之間形狀是不連續的。為了讓閉合段連續地連接在兩側橋梁段上，利用Lack-of-Fit Force功能求出閉合段兩端所需的強制變位量，將其轉換成產生此變形的構件內力，並將此力量施加予閉合段。

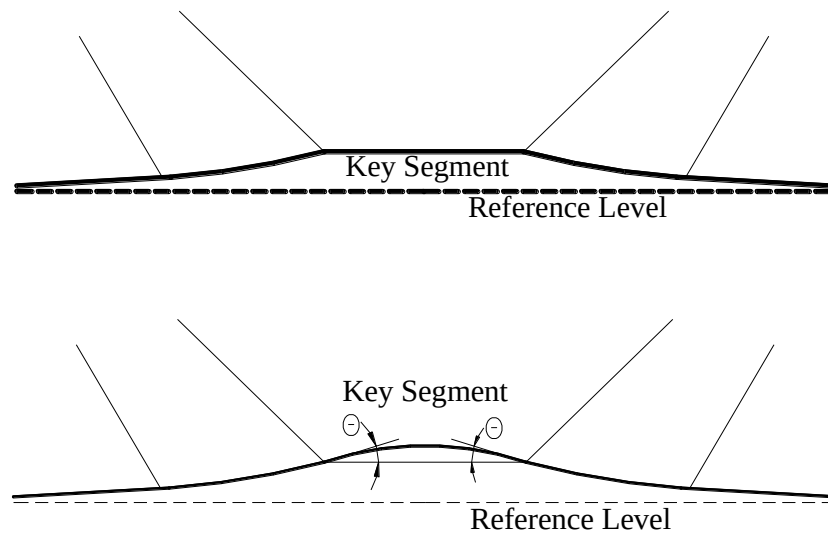


圖 33 Lack of Fit Force 計算- Beam

定義順施工階段

本例題考慮載重和邊界條件的變化，共分為 13 個施工階段。

利用初始平衡狀態分析計算得出的主索初拉力，直接進行順施工階段分析。只對主索、跨中的閉合段和 Stage 2 階段啟用的邊跨加勁梁部分使用了 Lack-of-Fit Force 未閉合配合力功能。邊跨與支座連接時結構體系也會變化，故邊跨的加勁梁也一併考慮了 Lack-of-Fit Force 未閉合配合力。

本例題的施工階段如表 5 所列。

表 5 施工階段列表

	內容	備註
Stage 1	主塔、主塔和加勁梁的臨時連接	
Stage 2	邊跨施工 (Element 1 to 5 & 16 to 20)、施工支架、邊跨支承	Lack-of-Fit Force
Stage 3	施工作業車 1 載重	
Stage 4	拆除施工支架、生成拉索 (Element 34, 39)	Lack-of-Fit Force
Stage 5	生成加勁梁構件 (Element 6, 7, 14, 15)	
Stage 6	生成拉索 (Element 35, 38)	Lack-of-Fit Force
Stage 7	移除作業車 1 載重、施工作業車 2 載重	
Stage 7-1	生成拉索 (Element 33, 40)	Lack-of-Fit Force
Stage 8	生成加勁梁構件 (Element 8, 9, 12, 13)	
Stage 9	生成拉索 (Element 36, 37)	Lack-of-Fit Force
Stage 10	移除作業車 2 載重、施工作業車 3 載重	
Stage 11	移除作業車 3 載重	
Stage 11-1	生成閉合段梁構件 (Element 10, 11)	Lack-of-Fit Force
Stage 12	主塔與加勁梁連接體系轉換、施加支承強制位移載重 (Jack Up load)	Rigid link→ Elastic link
Stage 13	施加附加靜載重 (成橋階段 Final Stage)	

順施工階段分析

順施工階段分析(Forward Analysis)是指按橋梁施工順序進行分析的方法。

在本例題中，通過順施工階段分析查看分析模型的結構變化，主索張力變化、位移及彎矩變化。

順施工階段分析的分析步驟如圖 34 所示。

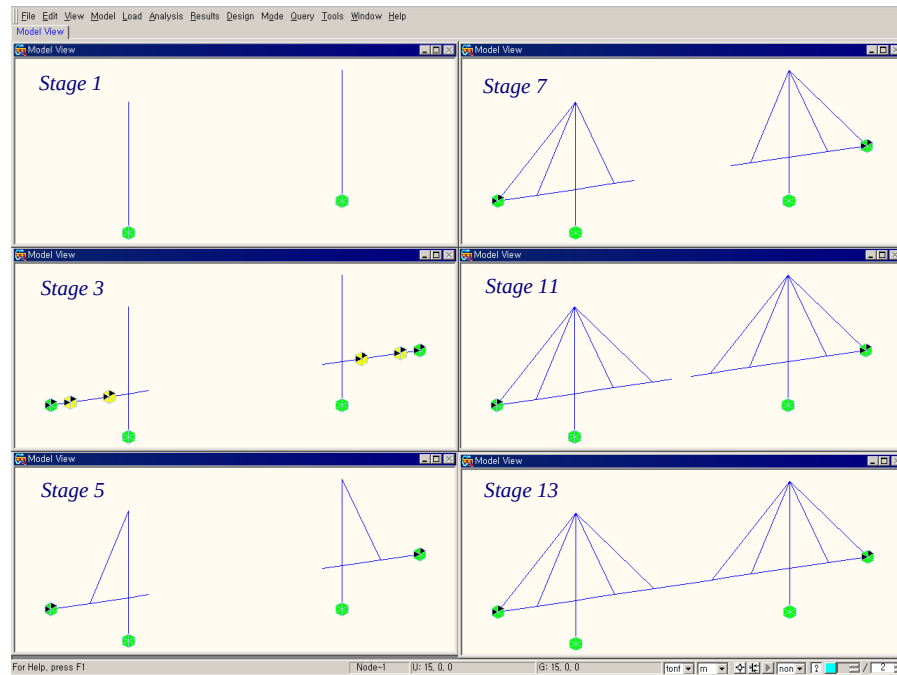


圖 34 順施工階段分析的分析步驟

將成橋階段分析模型以其他檔名另存，以該檔案建立順施工階段分析模型。



> **Save As (Cable Stayed Forward Construction)**

建立施工階段分析模型的步驟如下：

1. 順施工階段分析模型

將成橋階段分析模型中使用的 Turss 單元轉換為 Cable 單元。
定義正裝分析的載重狀況。

2. 定義施工階段名稱

劃分施工階段並定義施工階段名稱。

3. 定義結構群組

將各施工階段添加或拆除的單元及要輸入未閉合配合力的單元定義為結構群組。

4. 定義邊界群組

將各施工階段添加或拆除的邊界條件定義為邊界群組。

5. 定義載重群組

將各施工階段添加或拆除的載重條件定義為載重群組。

6. 定義施工階段

定義各施工階段的結構群組、邊界群組、載重群組。

順施工階段分析模型

為了建立施工階段模型，首先需要刪除成橋階段分析模型中的載重組合 LCB 1、LCB 2 及單位初拉力 Tension 1 ~ Tension 4。

順施工階段分析模型中要輸入主索的 **Pretension Loads** 初拉力載重，因此重新定義主索初拉力的載重狀況。

Results 表單 > **Load Combination**

Load Combination List > Name > **LCB 1, LCB 2** Delete

Load 表單 > **Static Load Cases**

Name (**Tension 1**) ~ Name (**Tension 4**) Delete

Name (**Pretension**); Type > **User Defined Load**

Description (**Pretension from Forward Analysis**) ↵

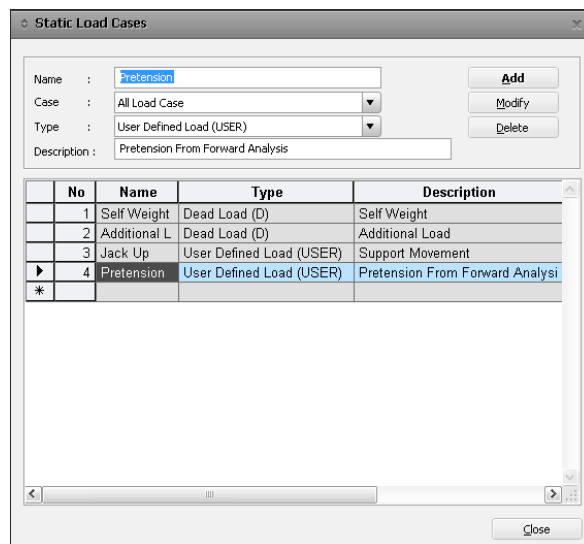


圖 35 主索初拉力載重狀況的定義

為了考慮斜張橋拉索構件垂度的影響，斜張橋施工階段分析中應考慮索單元的幾何非線性。將成橋階段分析中使用的 Truss 桁架單元轉換為 Cable 索單元。

斜張橋中使用的索單元是考慮了軸向勁度的等效桁架單元。

Node/ Element 表單 >  **Change Elements Parameters**

 **Select identity - Elements**

Select Type > **Element Type**

Nodes (off) ; **Elements** (on)

(Truss) > **Add** ↓

Parameter Type > **Element Type** (on)

Mode > From > **Truss** (on) ; To > **Tension only/Hook/Cable** (on)

Cable (on) ; Lu > **56.5685** m (Elements 33, 36, 37, 40) ↓

Cable (on) ; Lu > **44.7214** m (Elements 34, 35, 38, 39) ↓

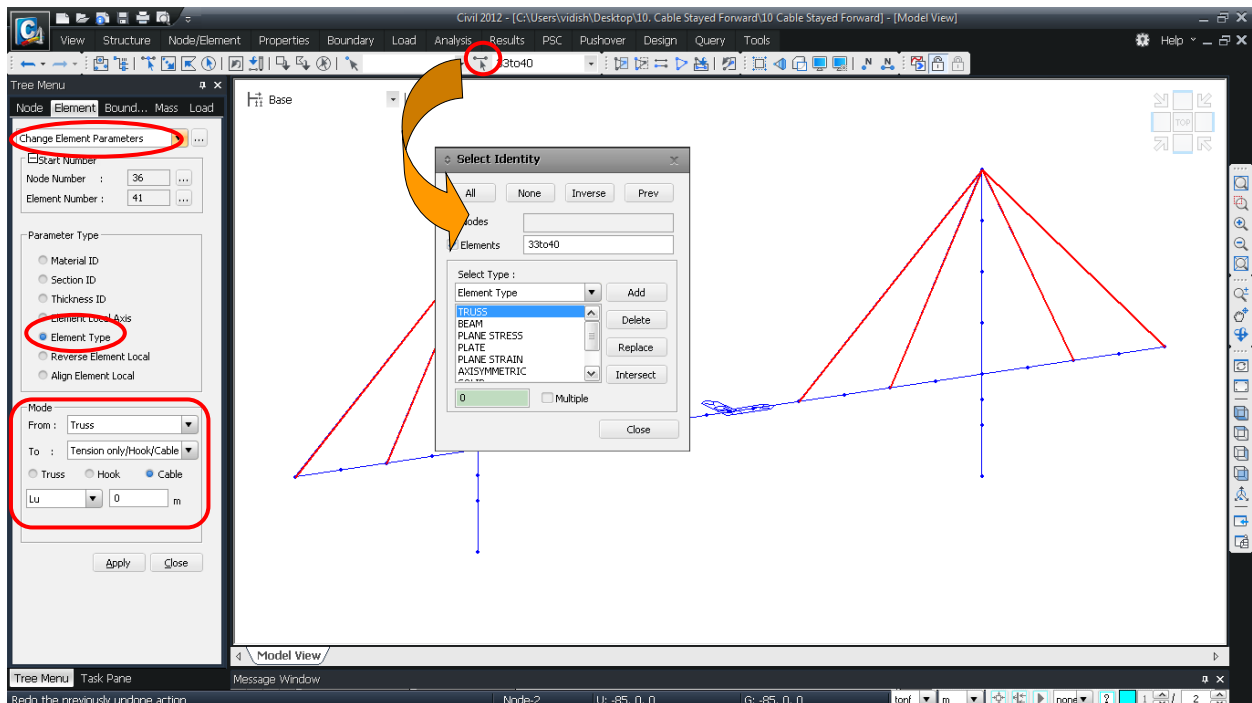


圖 36 桁架單元轉換為索單元

定義施工階段

接下來定義進行順施工階段分析所需的各施工階段。首先在施工階段對話框內輸入施工階段名稱，本例題含成橋階段在內，共定義了 13 個施工階段。

Load 表單 > Construction Stage Option >  Define Construction Stage



以序列號方式命名施工階段，利用 Suffix 可同時定義多個施工階段。

Stage>Name (Stage); Suffix (1to7)

Save Result>Stage (on) 



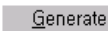
Stage>Name (Stage7-1)

Save Result>Stage (on) 



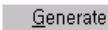
Stage>Name (Stage); Suffix (8to11)

Save Result>Stage (on) 



Stage>Name (Stage11-1)

Save Result>Stage (on) 



Stage>Name (Stage); Suffix (12to13)

Save Result>Stage (on) 

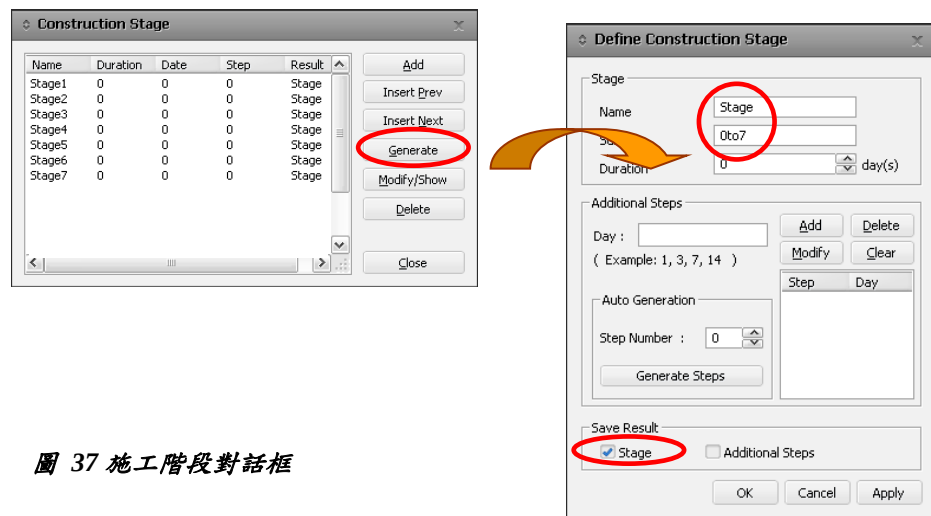


圖 37 施工階段對話框



圖 38 施工階段對話框

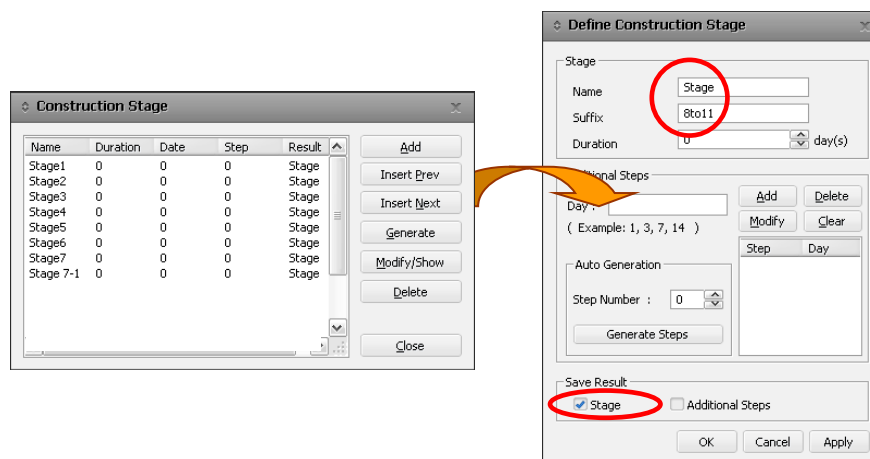


圖 39 施工階段對話框

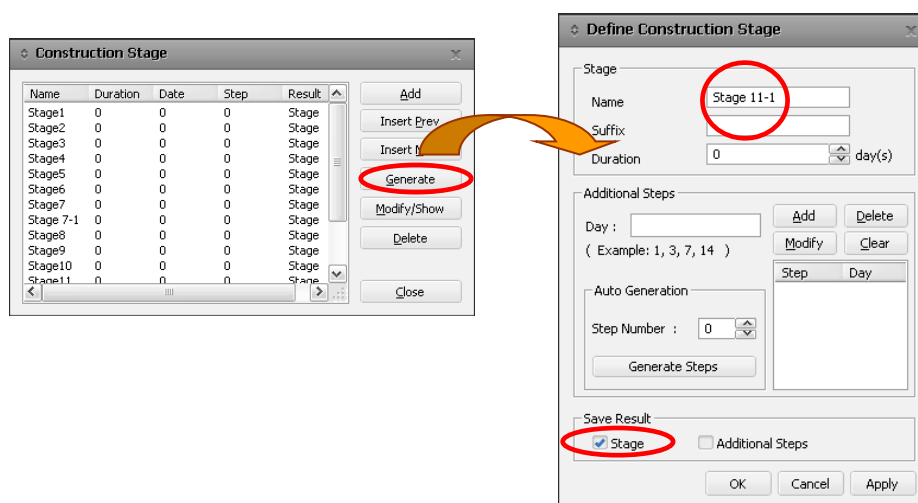


圖 40 施工階段對話框

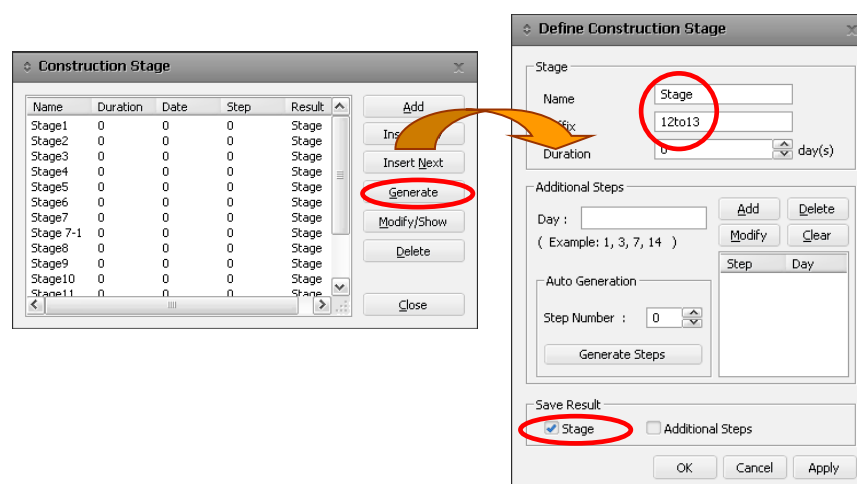


圖 41 施工階段對話框

定義結構群組

將各施工階段添加或拆除的單元定義為結構組。

首先定義結構群組的名稱，再將各單元賦予對應的結構群組。

Group 表單

Group>Structure Group>**New...** (按滑鼠右鍵)

Name (**Stage**); Suffix (**1to13**)

Name (**Lack of Fit Force**)

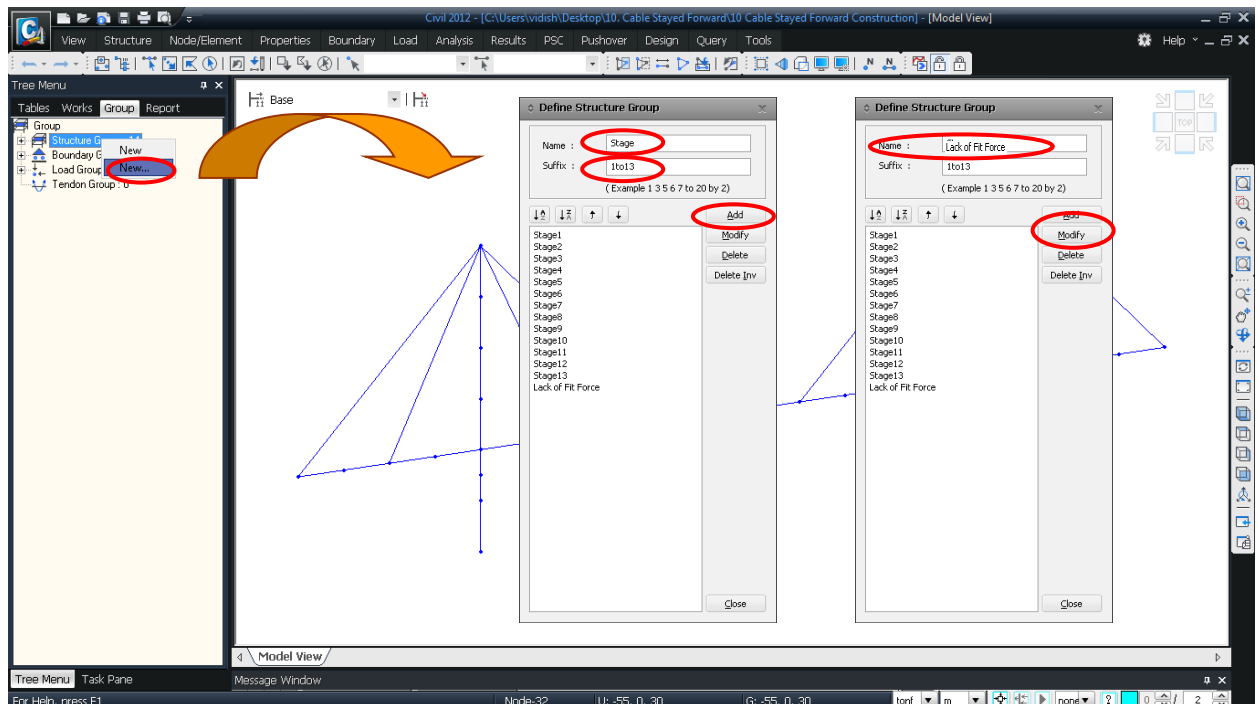


圖 42 定義結構群組

接著依序將各施工階段添加或拆除的結構單元賦予相應的結構群組。

Stage 1 階段設定為只有主塔部分施工完成的狀態。

Stage 2 階段設定為邊跨設定支架的狀態。

Stage 3 與 Stage10 的階段是為了考慮中間跨設置加勁梁而施加工作車載重的狀態，結構體系無變化，因此無需增減結構單元。

Group > Structure Group

 **Select Window** (① 圖 43)

Stage 1 (Drag & Drop)

 **Select Window** (② 圖 43)

Stage 2 (Drag & Drop)

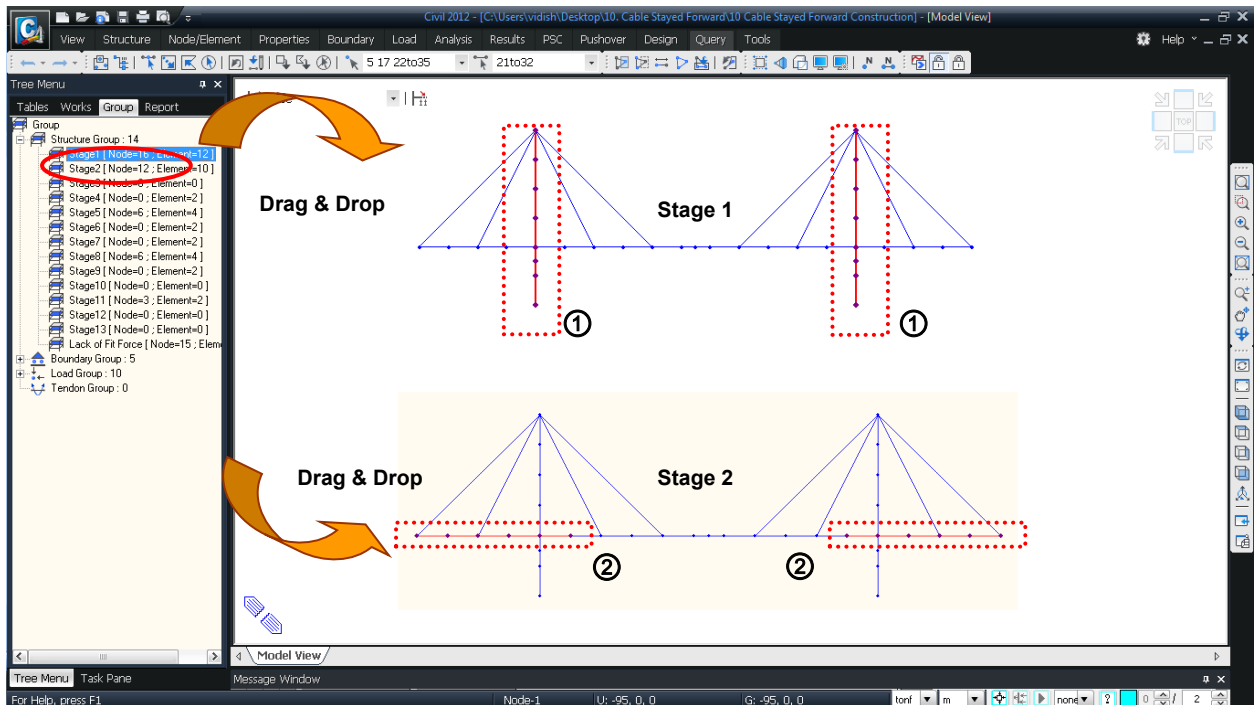


圖 43 定義結構群組 Stage 1 ~ Stage 2

Group > Structure Group

 **Select Intersect** (① 圖 44)

Stage 4 (Drag & Drop)

 **Select Window** (② 圖 44)

Stage 5 (Drag & Drop)

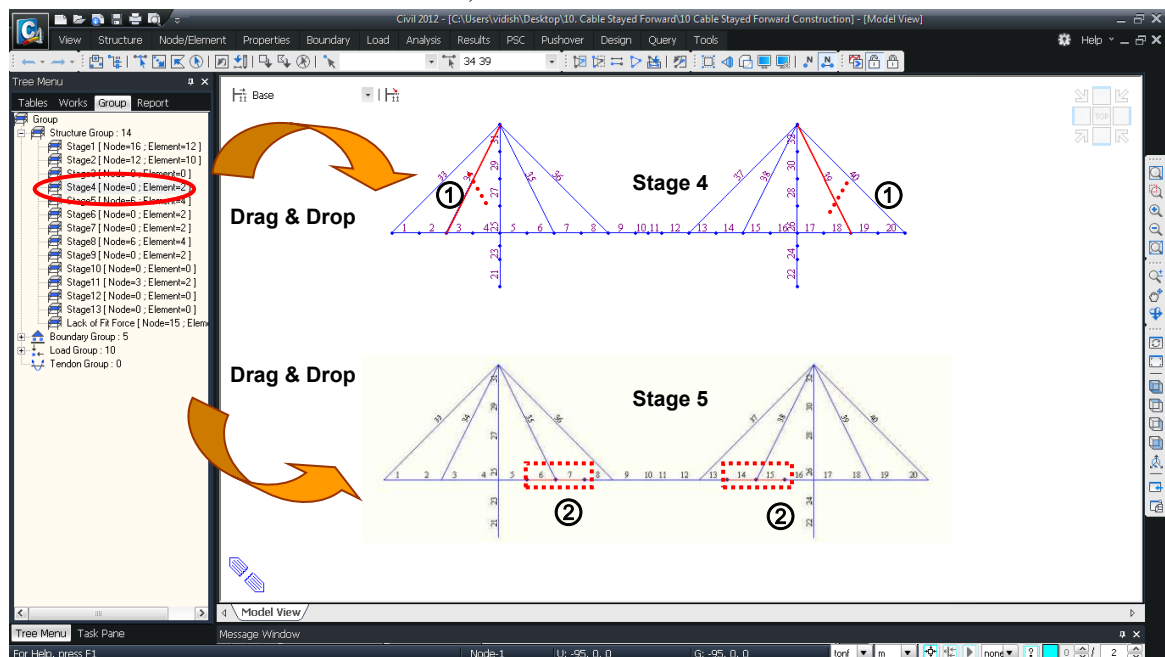


圖 44 定義結構群組 Stage 4 ~ Stage 5

Group > Structure Group

 **Select Intersect** (① 圖 45)

Stage 6 (Drag & Drop)

 **Select Intersect** (② 圖 45)

Stage 7 (Drag & Drop)

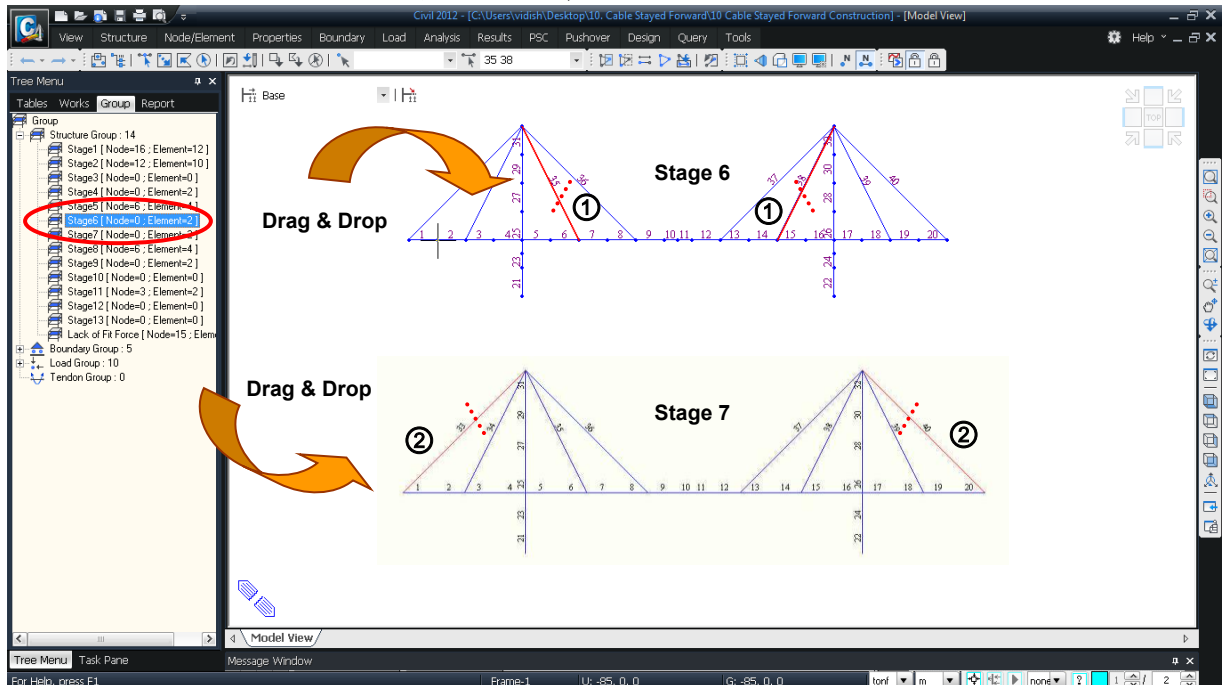


圖 45 定義結構群組 Stage 6~ Stage 7

Group > Structure Group

 **Select Window** (① 圖 46)

Stage 8 (Drag & Drop)

 **Select Intersect** (② 圖 46)

Stage 9 (Drag & Drop)

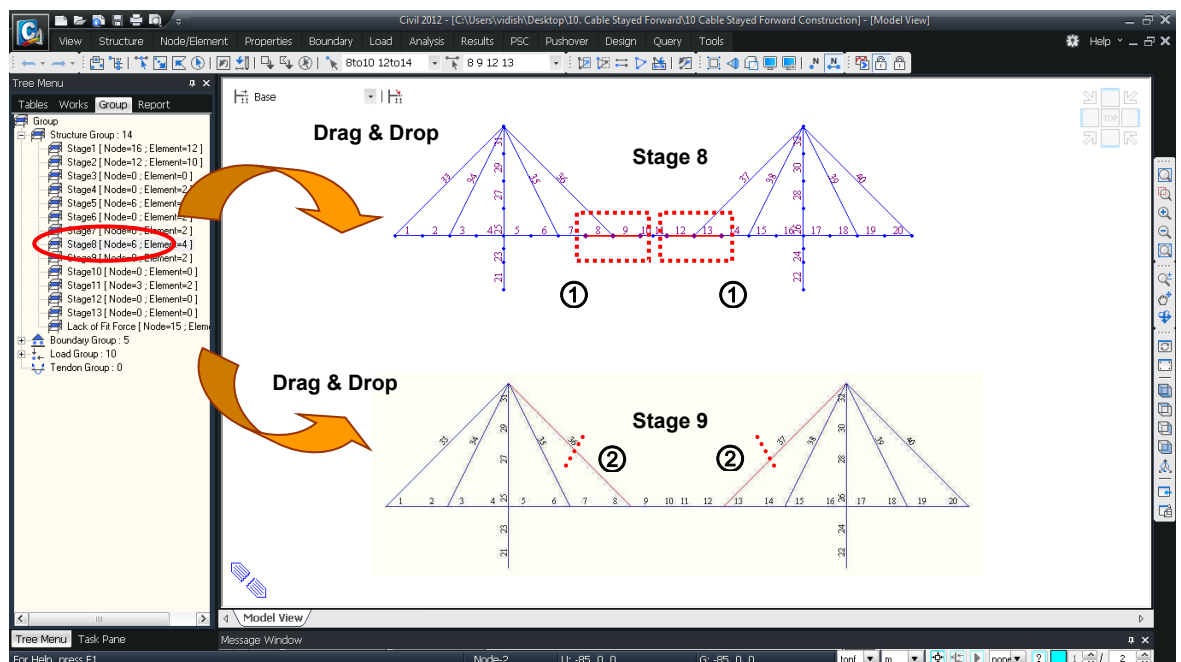


圖 46 定義結構群組 Stage 8~ Stage 9

將順施工階段分析中 Stage 11 階段添加的結構單元賦予相應的結構群組。
Stage 11 階段為施工最後的閉合階段。

 **Select Window** (① 圖 45)

Stage 11 (Drag & Drop)

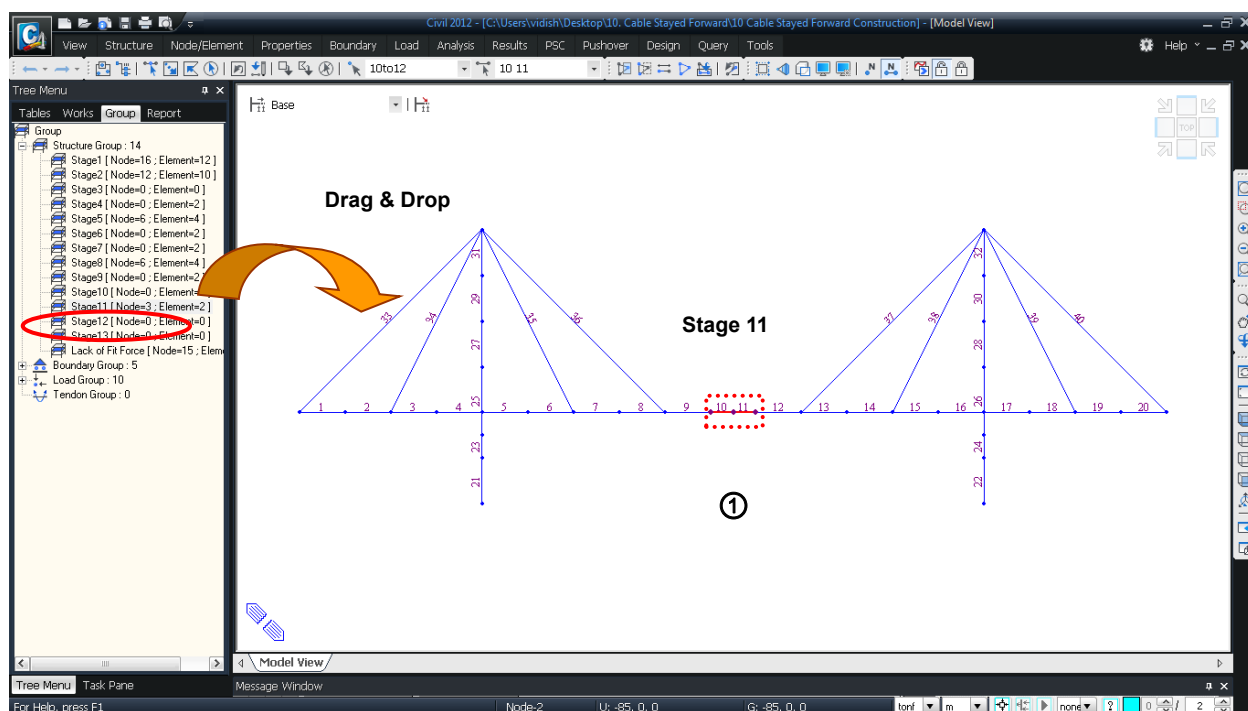


圖 47 定義結構群組 Stage 11

將各施工階段中考慮 Lack of Fit Force 未閉合配合力的相應單元與節點賦予結構群組-Lack of Fit Force。

Group > Structure Group

選取節點: 1to6 10to12 16to21 (① 圖 48)

選取單元: 1to5 10 11 16to20 33to36 37to40 (① 圖 48)

Lack of Fit Force (Drag & Drop) 指派

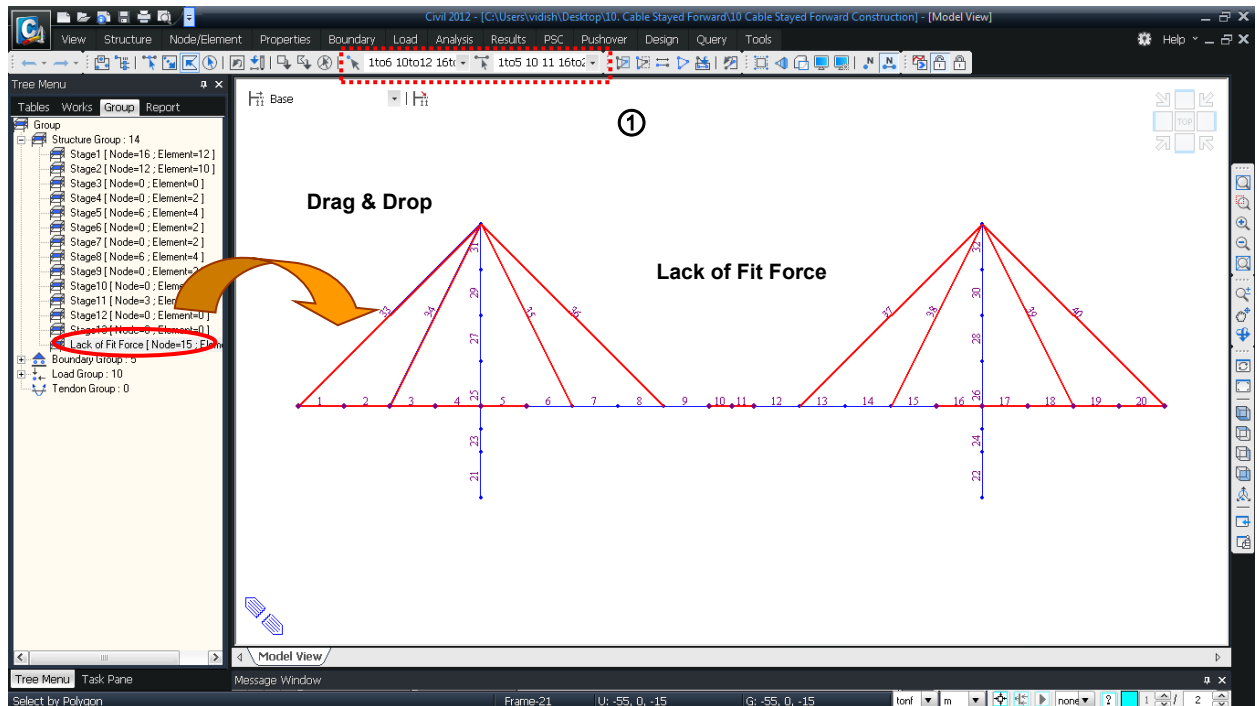


圖 48 定義結構群組 Lack of Fit Force

定義邊界群組

將各施工階段添加和刪除的邊界條件定義為邊界群組。

首先定義邊界群組的名稱，在將邊界條件賦予對應的邊界群組。



Active All

Group 表單

Group>Boundary Group>**New...** (按滑鼠右鍵)

Name **(Fixed Support (Tower))** ↵

Name **(Hinge Support (Pier))** ↵

Name **(Elastic Link (Tower))** ↵

Name **(Temporary Support (Tower))** ↵

Name **(Temporary Bent)** ↵

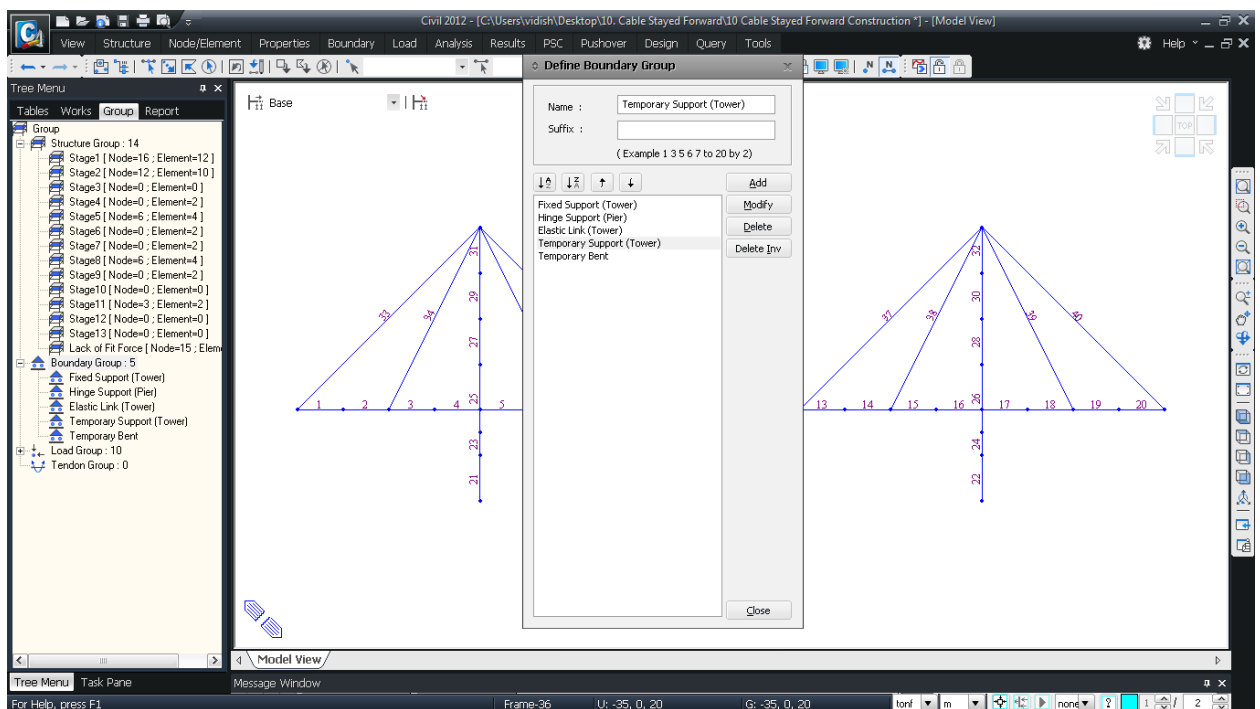


圖 49 定義邊界群組

將成橋階段分析定義的主塔固定端、橋台鉸支承、主塔彈性連接、主塔臨時支承、支撐架等邊界條件賦予給各施工階段的邊界組。

Group>Boundary Group

 **Select Window** (① 圖 50)

Fixed Support (Tower) (Drag & Drop)

Select Boundary Type>**Support** (on) ↓

 **Select Window** (② 圖 50)

Hinge Support (Pier) (Drag & Drop)

Select Boundary Type>**Support** (on) ↓

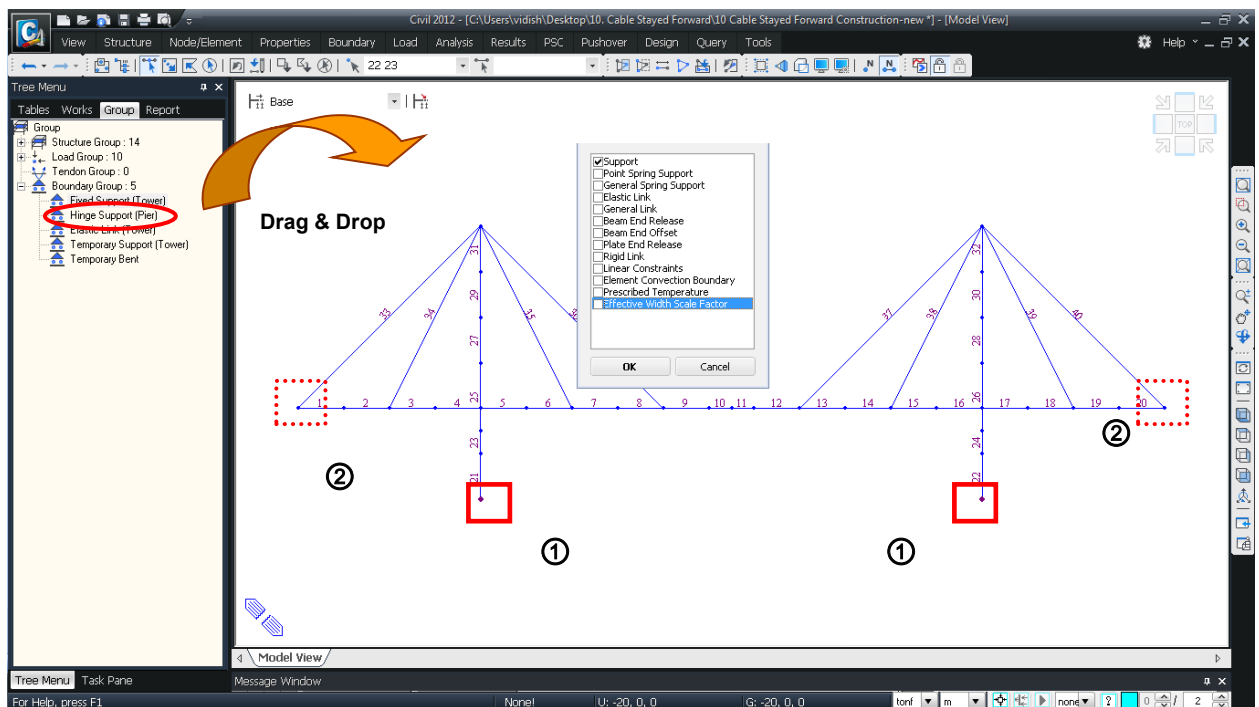


圖 50 建立主塔固定端、橋台鉸支承的邊界群組

將主塔彈性連接Elastic Link (Tower)的邊界條件定義為邊界組。

重新定義主塔和加勁梁的彈性連接，依 *Elastic Link-General Type* 彈性連接的一般類型設定。支承條件如下：

SDx : **500,000** tonf/m, SDy : **10,000,000** tonf/m, SDz : **10,000,000** tonf/m

SRx : **0** tonf/m, SRy : **0** tonf/m, SRz : **0** tonf/m

Boundary 表單 > *Elastic Link*

Boundary Group Name > **Elastic Link (Tower)**

Options > **Add** ; Link Type > **General Type**

SDx (tonf/m) (**500000**) ; SDy(tonf/m) (**10000000**) ; SDz(tonf/m) (**10000000**)

SRx (tonf/m) (**0**) ; SRy(tonf/m) (**0**) ; SRz(tonf/m) (**0**) ↵

2 Nodes (**26, 5**)

2 Nodes (**27, 17**) ↵

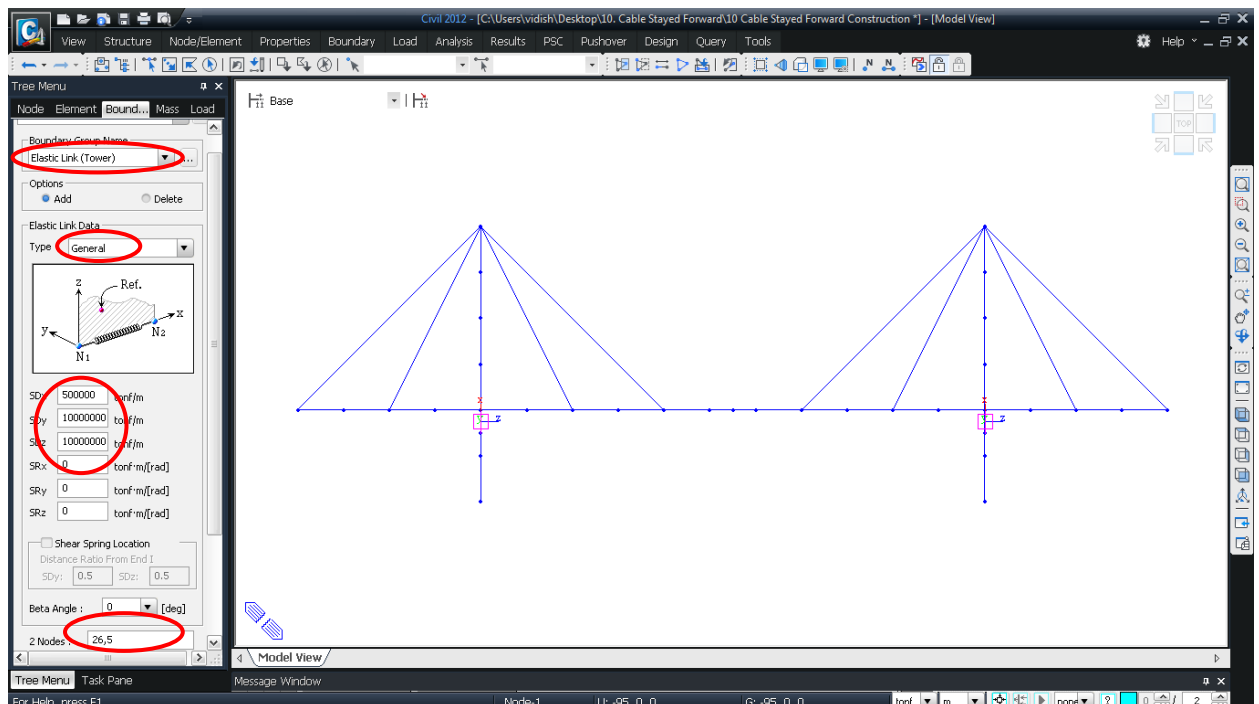


圖 51 建立主塔彈性連接邊界條件

將主塔臨時支承Temporary Support (Tower)的邊界條件指定為邊界群組。

主塔和加勁梁的臨時支承利用 *Elastic Link- Rigid Type* 彈性連接-剛性類型來模擬。

Boundary 表單 > *Elastic Link*

Boundary Group Name > **Temporary Support (Tower)**

Options > **Add** ; Link Type > **Rigid Type**

2 Nodes (**26, 5**)

2 Nodes (**27, 17**) ↴

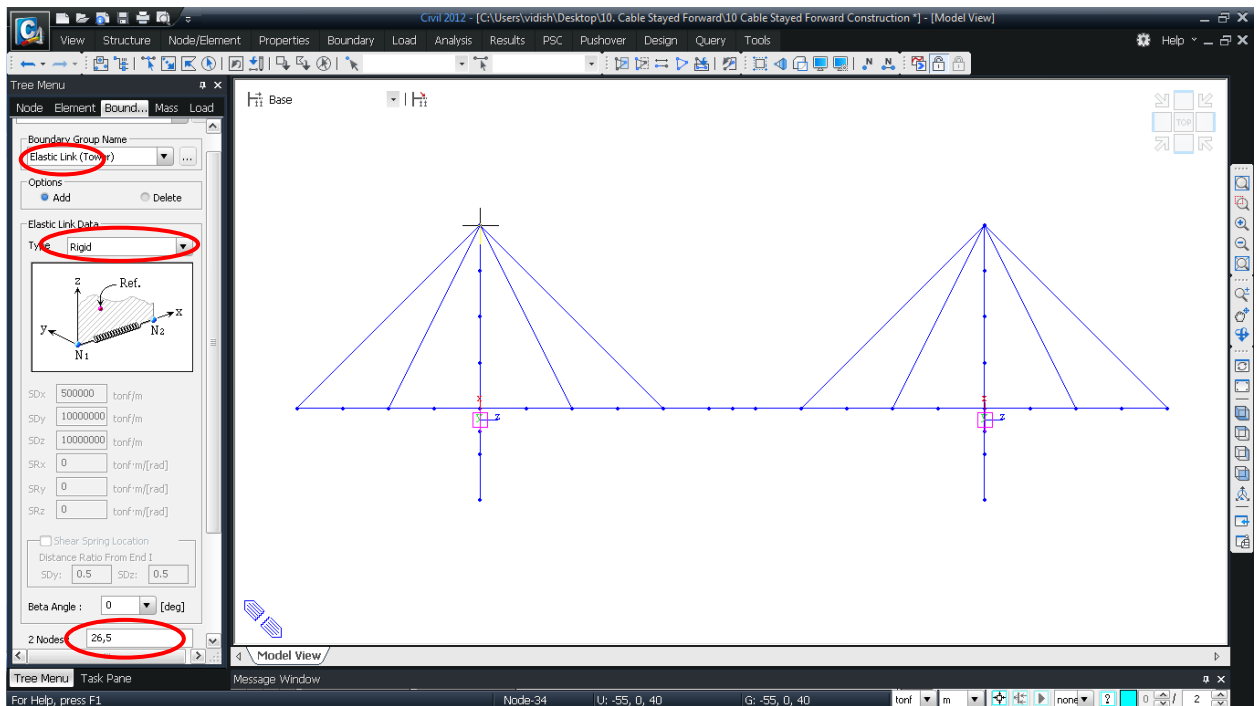


圖 52 建立主塔臨時支承邊界條件

將臨時支撐架(Temporary Bent)的邊界條件指定為邊界群組。

臨時支撐架的邊界條件利用 *Point Spring Support* 節點彈簧支承來模擬。
支承條件如下：

SDx : 0 tonf/m, SDy : 10,000,000 tonf/m, SDz : 10,000,000 tonf/m
SRx : 10,000,000 tonf/m, SRy : 0 tonf/m, SRz : 10,000,000 tonf/m

Boundary 表單 > *Point Spring*

 *Select Window* (① 圖 53 ; Node 2, 4, 18, 20)

Boundary Group Name>**Temporary Bent**

Options>**Add**

SDx (tonf/m) (0) ; SDy(tonf/m) (10000000) ; SDz(tonf/m) (10000000)

SRx (tonf/m) (10000000) ; SRy(tonf/m) (0) ; SRz(tonf/m) (10000000) ↵

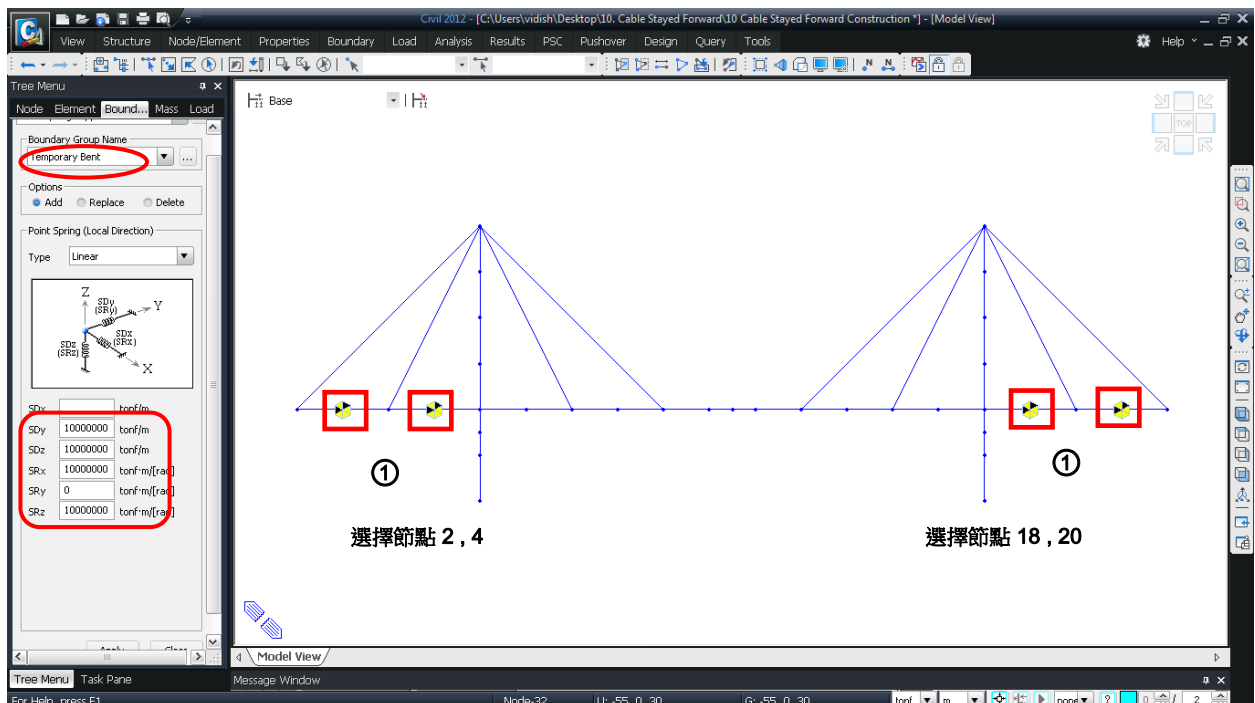


圖 53 建立臨時支撐架邊界條件

定義載重群組

將各施工階段添加和撤除的載重條件分配到對應的載重群組。

本例題順施工階段分析中考慮的載重為自重、外加靜載重、拉索初拉力 1~4、支承強制位移、制位移載重及工作車 1~3 載重。

首先定義載重群組的名稱，再將各載重條件賦予對應的載重群組。

Group 表單

Group>Load Group> **New...**(按滑鼠右鍵)

Name **(Self Weight)** ↙ 自重

Name **(Additional Load)** ↙ 外加靜載重

Name **(Pretension Load 1)** ↙ 拉索初拉力1

Name **(Pretension Load 2)** ↙ 拉索初拉力2

Name **(Pretension Load 3)** ↙ 拉索初拉力3

Name **(Pretension Load 4)** ↙ 拉索初拉力4

Name **(Jackup Load)** ↙ 支承強制位移

Name **(Derrick Crane 1)** ↙ 工作車1

Name **(Derrick Crane 2)** ↙ 工作車2

Name **(Derrick Crane 3)** ↙ 工作車3

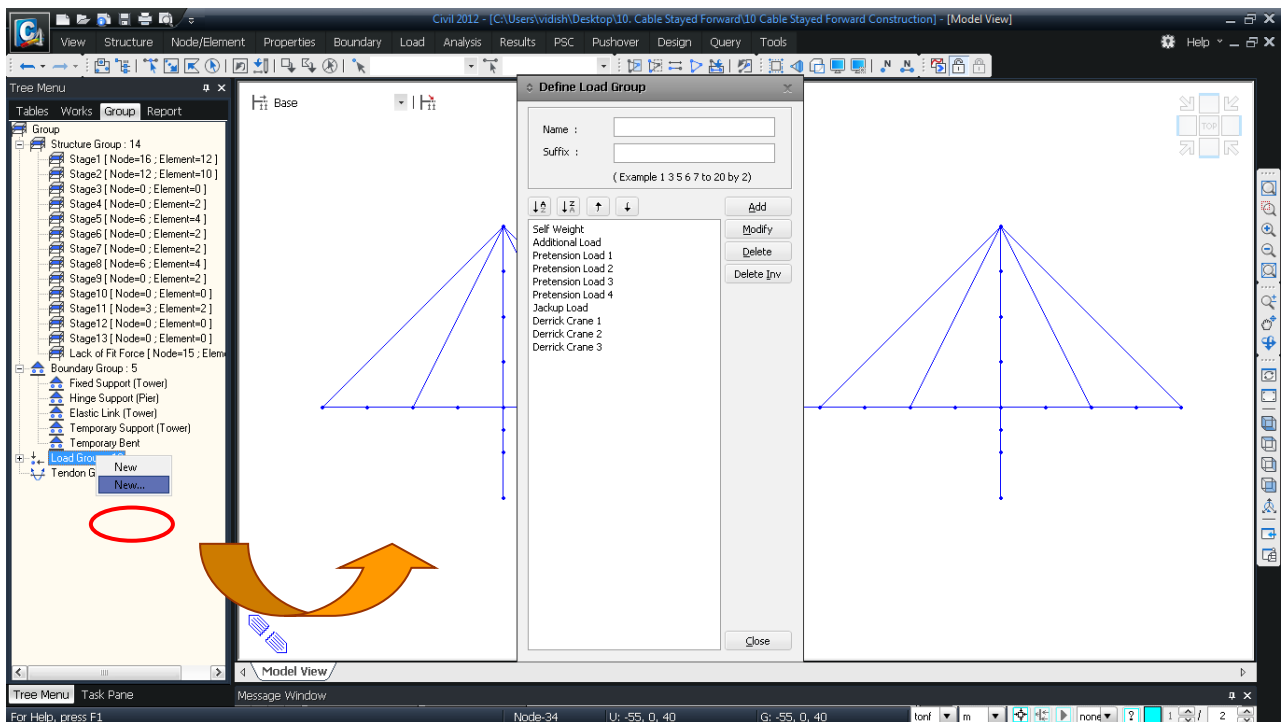


圖 54 定義載重群組

將成橋階段分析中自重的預設載重群組改為 SelfWeight。

Load 表單 > *Self Weight*

Load Case Name>**Self Weight**

Load Group Name>**Self Weight**

Operation> **Modify**

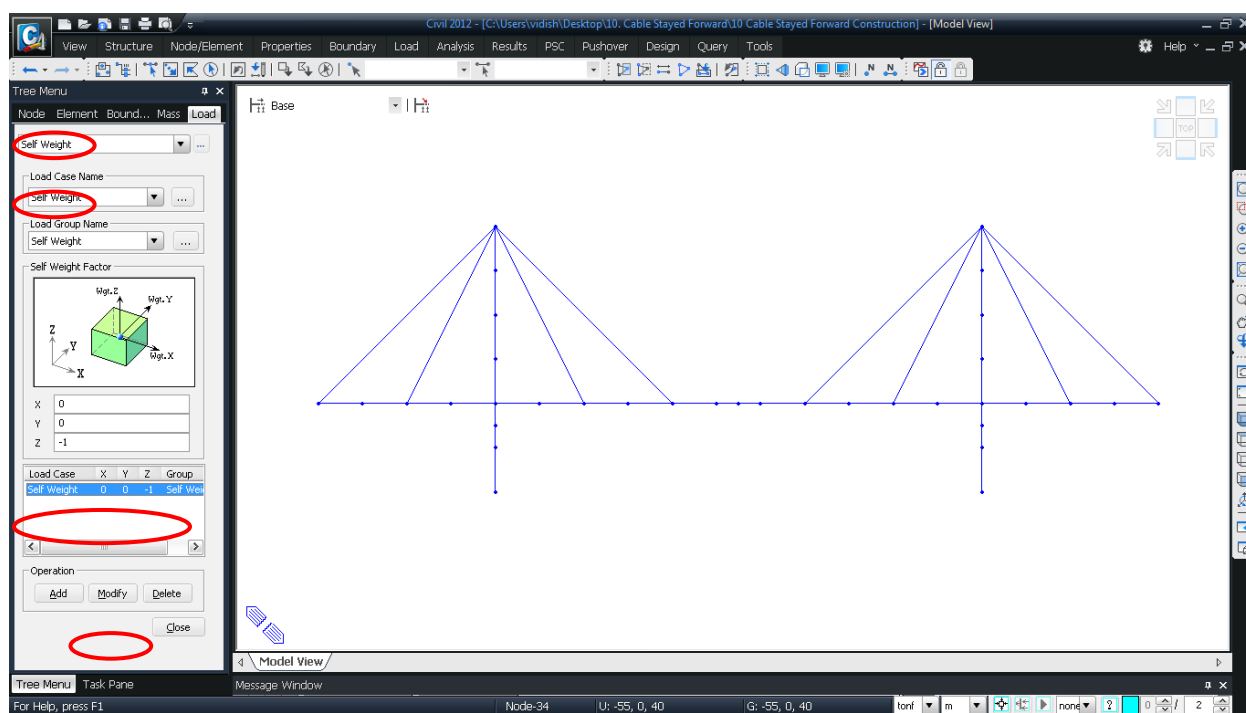


圖 55 修改自重載重群組

重新定義在成橋階段分析模型中輸入的外加靜載重以及支承強制位移載重組。

Group > Load Group

 **Select All**

Additional Load (Drag & Drop) 外加靜載重

Select Load Type>**Beam Loads** (on) ⌵

 **Select All**

Jack Up Load (Drag & Drop) 支承強制位移載重

Select Load Type>**Specified Displacements of Supports** (on) ⌵

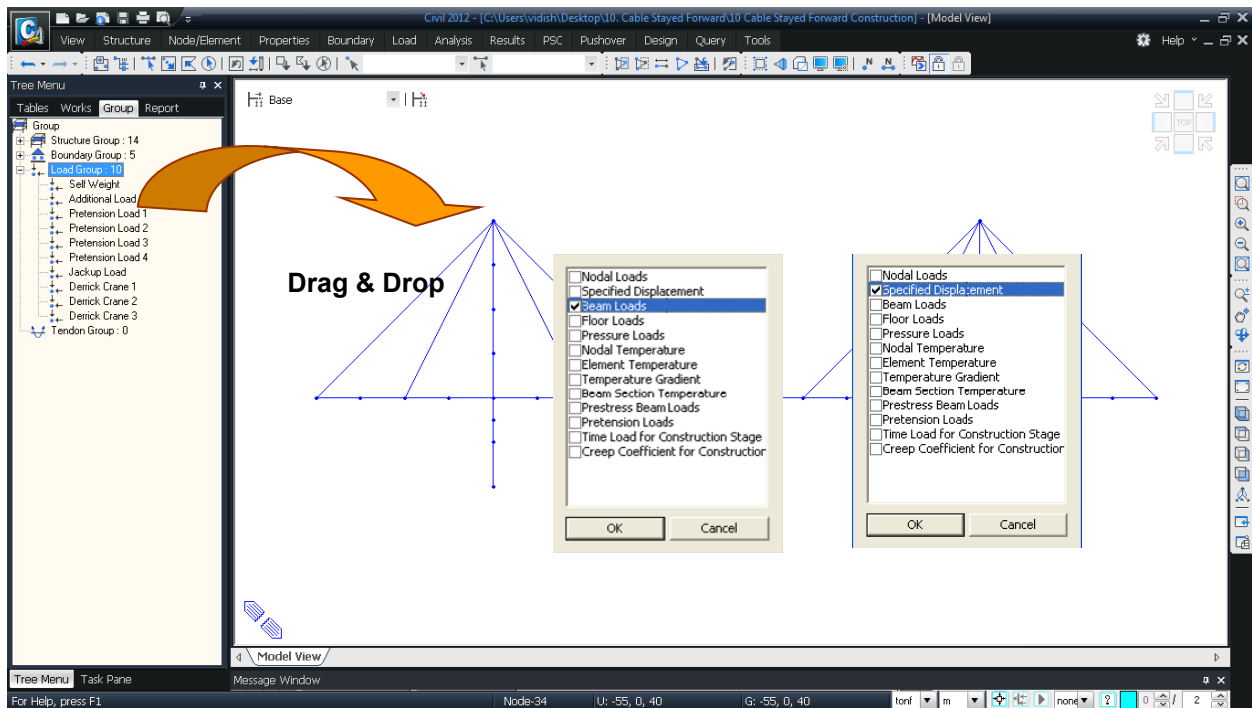


圖 56 定義外加靜載重及支承強制位移載重

輸入隨施工階段進行的工作車載重。工作車載重的變化隨著施工階段移動作用位置，因此在不同的位置輸入工作車1~3載重(Derrick Crane 1~3)。

輸入工作車載重之前，先行定義工作車的載重狀況。

Load 表單 / *Static Load Cases*

Name (**Derrick Crane**) ; Type > **Construction Stage Load**

Description (**Derrick Crane Load**) ↵

Load 表單 / *Nodal Loads*

 **Select Window** (① 圖 58; Node 6, 16)

Load Case Name> **Derrick Crane**

Load Group Name> **Derrick Crane 1** ; Options>**Add**

Nodal Loads>FZ (-80) ↵

 **Select Window** (② 圖 58; Node 8, 14)

Load Case Name> **Derrick Crane**

Load Group Name> **Derrick Crane 2** ; Options>**Add**

Nodal Loads>FZ (-80) ↵

 **Select Window** (③ 圖 58; Node 10, 12)

Load Case Name> **Derrick Crane**

Load Group Name> **Derrick Crane 3** ; Options>**Add**

Nodal Loads>FZ (-80) ↵

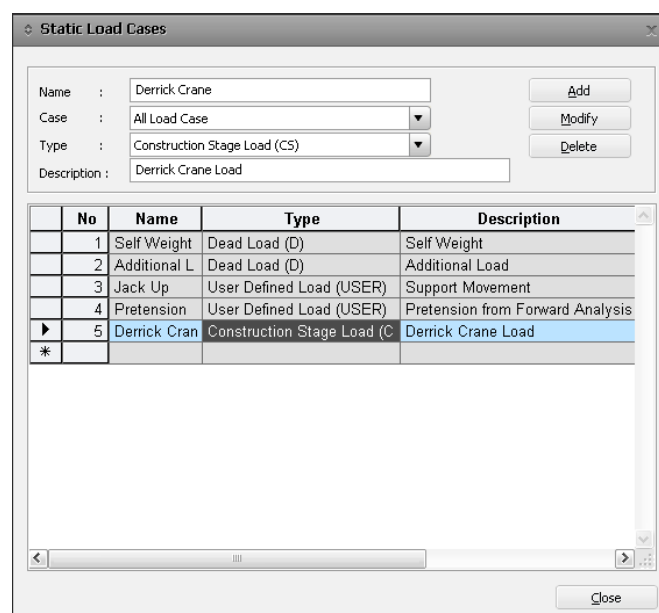


圖 57 建立工作車載重狀況

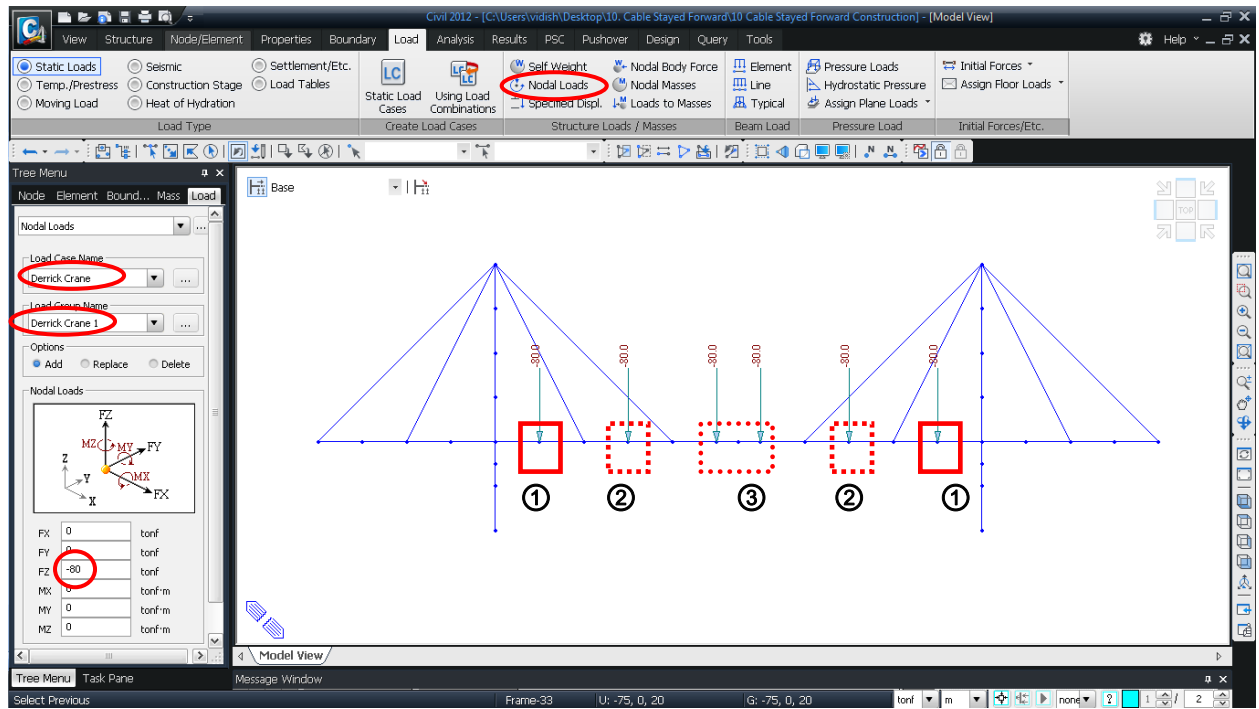


圖 58 輸入工作車載重

將完工階段分析中利用最佳化法則計算之索單元未知載重係數，輸入為個別索單元的 **Pretension Loads** 預拉力。

Load 表單 > **Temp./Prestress** > **Pretension Loads**

 **Select Intersect** (Elements : ① 圖 59; Element : 36, 37)

Load Case Name > **Pretension** ; Load Group Name > **Pretension Load 1**

Options > **Add** ; Pretension Load (**340.835**) ↵

...

Load Case Name > **Pretension** ; Load Group Name > **Pretension Load 4**

Options > **Add** ; Pretension Load (**254.370**) ↵

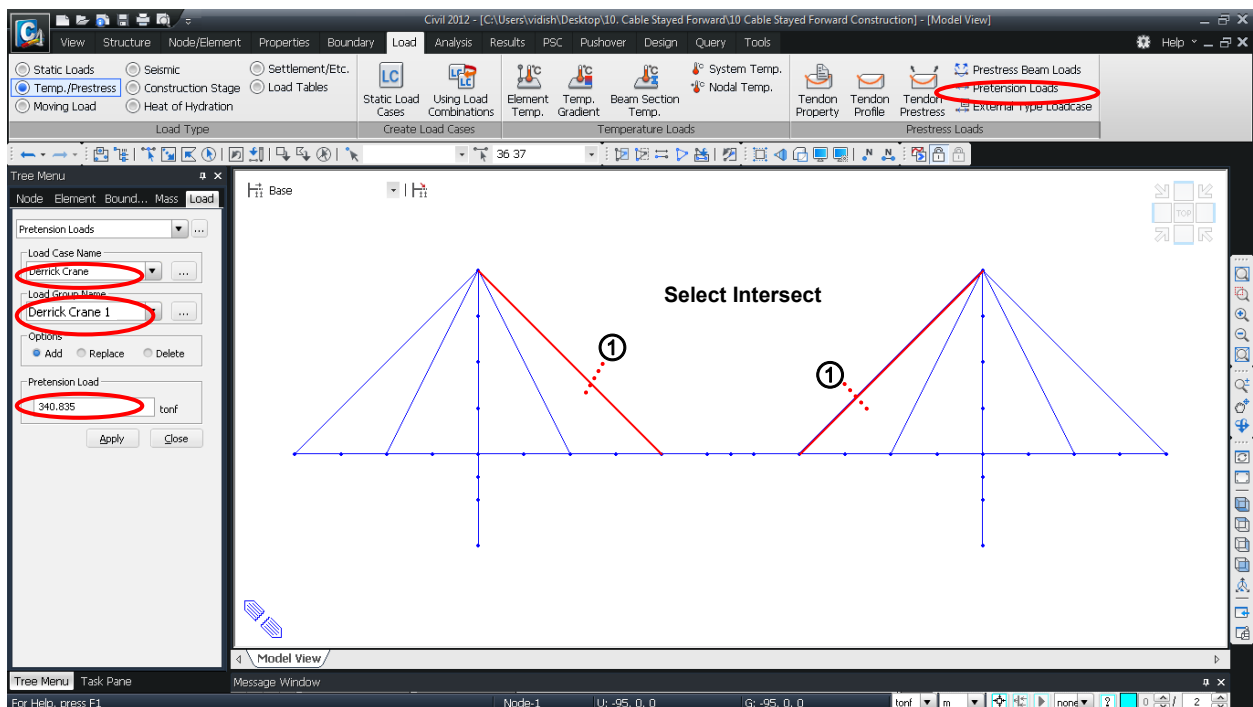


圖 59 輸入順施工階段分析索單元的初始預拉力

將表 6 中的初始預拉力賦予各索單元。

表 6. 使用最佳化法則計算之初拉力(預拉力載重 Pretension Loading)

Load Group	Element No.	Pretension Loading	Load Group	Element No.	Pretension Loading
Pretension Load 1	36, 37	340.835	Pretension Load 3	35, 38	193.011
Pretension Load 2	33, 40	333.808	Pretension Load 4	34, 39	254.370

定義指派施工階段

將前面定義的結構群組、邊界群組及載重群組分配到各對應的施工階段。

首先定義 Stage 1 施工階段，Stage 1 為主塔施工狀態。

Load 表單 > Construction Stage Option >  *Define C.S.*

Stage 1 

Save Result > **Stage** (on)

Element 表單 > Group List > **Stage 1**

Activation > 

Boundary 表單 > Group List > **Fixed Support (Tower)**

Boundary 表單 > Group List > **Temporary Support (Tower)**

Support/Spring Position > **Deformed** (on)

Activation > 

Load 表單 > Group List > **Self Weight**

Activation >  ↵

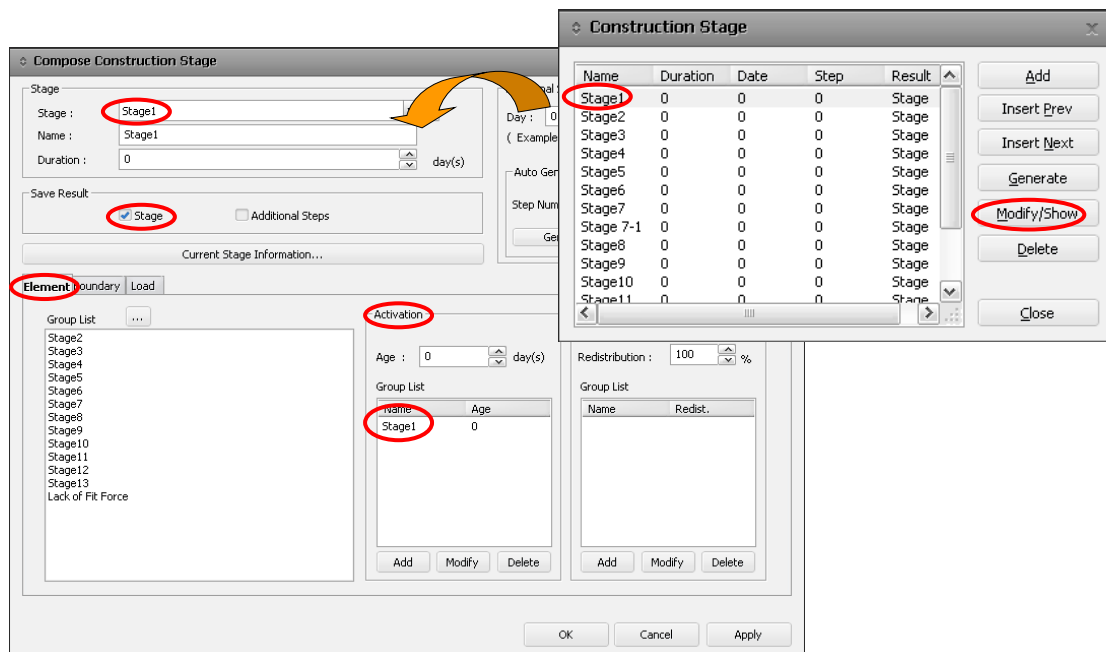


圖 60 定義施工階段 Stage 1 的單元

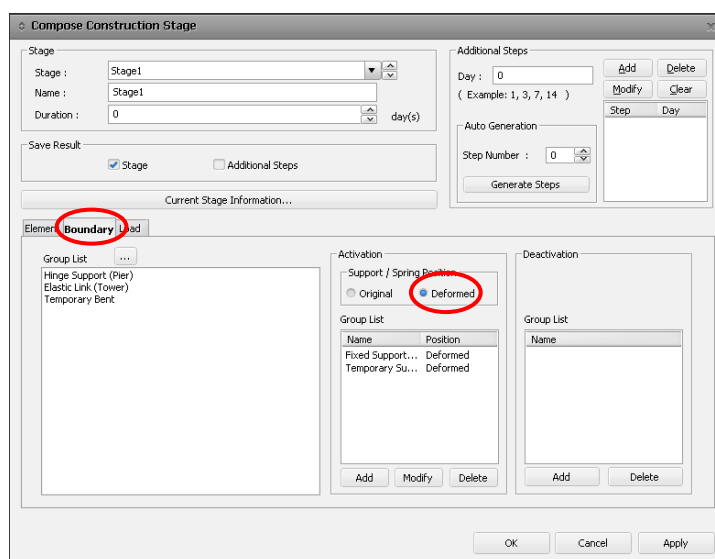


圖 61 定義施工階段 Stage 1 的邊界條件

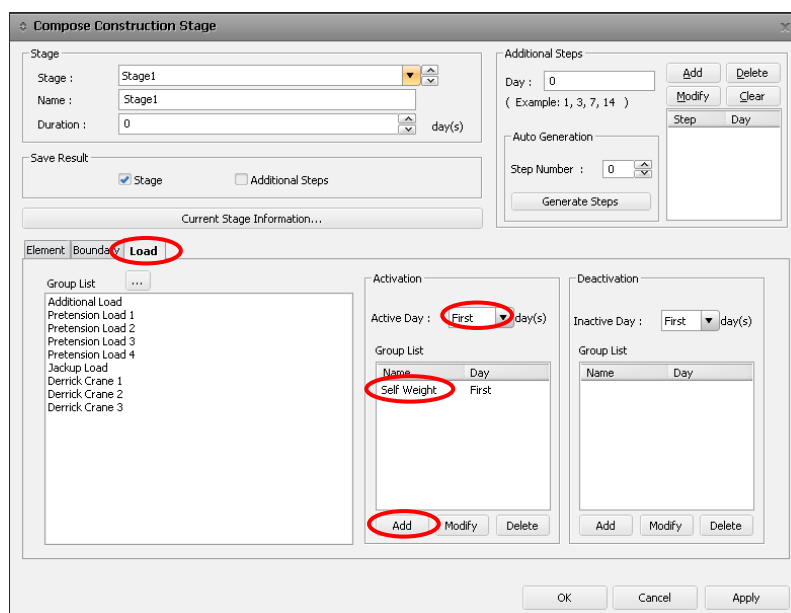


圖 62 定義施工階段 Stage 1 的載重

參照表 7 順施工階段工序依序定義施工階段 CS 1 到 CS 13 的資料。

表 7. Forward Construction Stage 順施工階段分析定義

	Structure		Boundary		Load Group	
	Activation	Deactivation	Activation	Deactivation	Activation	Deactivation
Stage 1	Stage1		Fixed Support (Tower) (Deformed) Temporary Support... (Deformed)		Self Weight	
Stage 2	Stage2		Hinge Support (Pier) (Deformed) Temporary Bent (Deformed)			
Stage 3					Derrick Crane1	
Stage 4	Stage4			Temporary Bent	Pretension Load 4	
Stage 5	Stage5					
Stage 6	Stage6				Pretension Load 3	
Stage 7					Derrick Crane2	Derrick Crane1
Stage 7-1	Stage7				Pretension Load 2	
Stage 8	Stage8					
Stage 9	Stage9				Pretension Load 1	
Stage 10					Derrick Crane3	Derrick Crane2
Stage 11						Derrick Crane3
Stage 11-1	Stage11					
Stage 12			Elastic Link (Tower) (Deformed)	Temporary Support (Tower)	Jack Up Load	
Stage 13					Additional Load	

施工階段模型

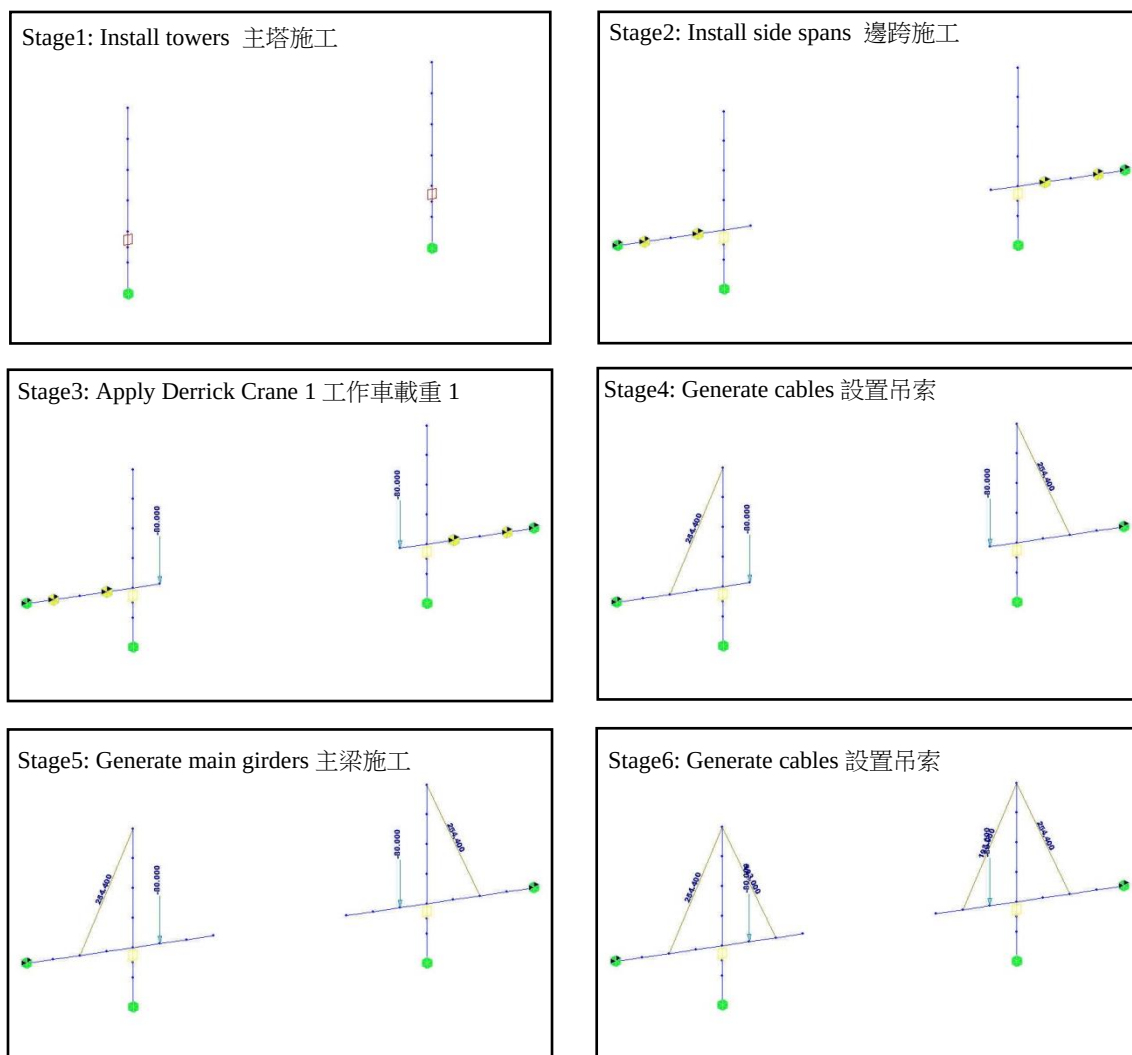


圖 63 施工階段模型 (Stage1~Stage6)

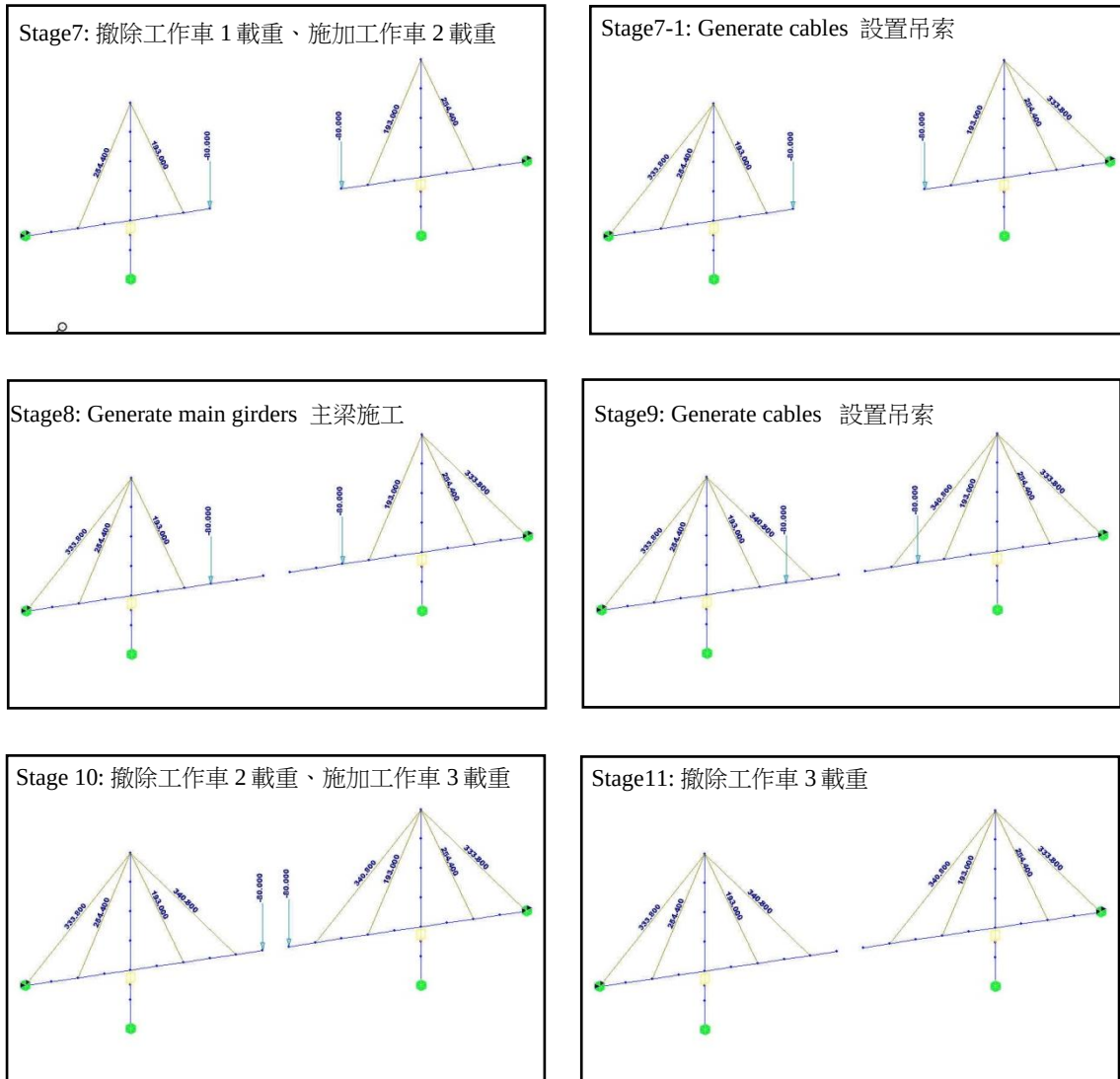


圖 64 施工階段模型 (Stage 7~Stage 11)

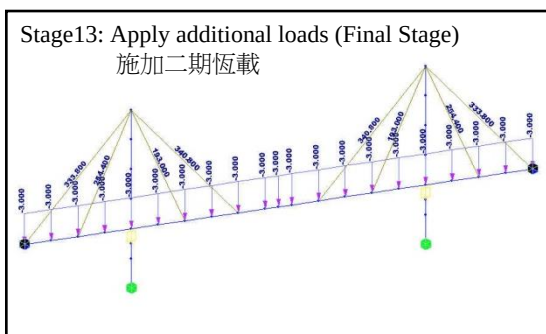
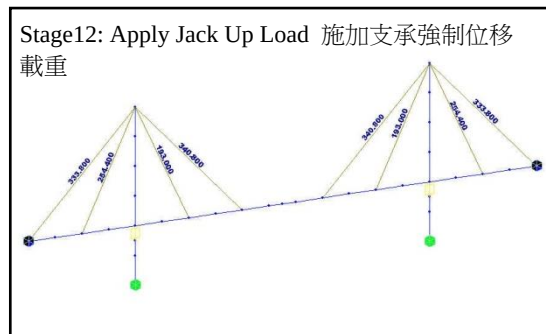
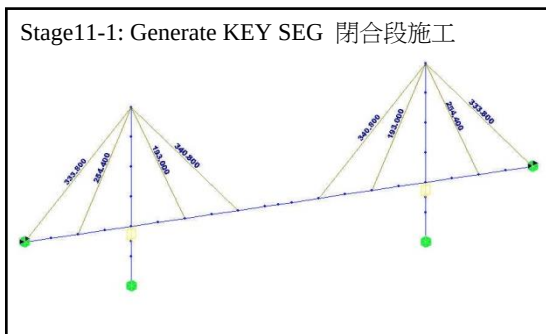


圖 65 施工階段模型 (Stage 11-1~Stage 13)

輸入施工階段分析資料

Analysis 表單 > **Construction Stage**Final Stage>**Last Stage** (on)Cable-Pretension Force Control > **Internal Force** (on)Initial Tangent Displacement Erected Structures> **All** (on)Lack of Fit Force Control (on) > **Lack of Fit Force** (Select) ↓

圖 65 施工階段分析控制項對話框

利用 **Cable-Pretension Force Control** 索初拉力控制功能和 **Lack of Fit Force Control** 未閉合配合力功能進行吊索初拉力的調整。

Cable-Pretension Force Control 索初拉力控制功能是調整施工控制張力的功能。一般進行斜張橋分析時，在吊索輸入初拉力後，因內力重分配而索力會有所變化，因此當直接輸入施工階段控制索力時，**Cable-Pretension Force Control** 要選擇 **External Force** 體外力類型。

但若遇到類似本例題中採用成橋階段分析計算的初拉力時，**Cable-Pretension Force Control** 則應選擇 **Internal Force** 體內力類型，再利用 **Lack of Fit Force** 未閉合配合力功能來自動計算施工階段控制初拉力。

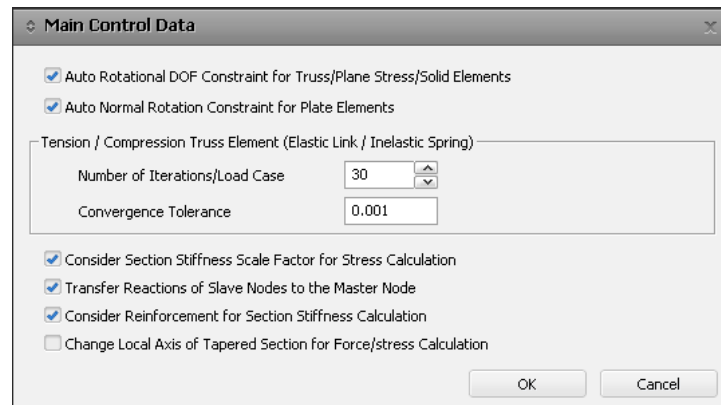
輸入分析主要控制資料

為獲得較佳的收斂結果，我們將各載重狀況的分析迭代次數更改為 30。

Analysis 表單 > **Main Control Data**

Tension / Compression Truss Element (Elastic Link / Inelastic Spring)

Number of Iterations/Load Case > **30** ↴



運行結構分析

對自重、外加靜載重、拉索初拉力、支承強制位移、工作車等載重條件狀況下，進行施工階段分析。

Analysis >  **Perform Analysis** ↴

查看施工階段分析結果

透過施工階段分析查看各施工階段的變形及構件內力的變化。

查看變形形狀

查看加勁主梁及主塔的變形形狀。

將滑鼠移動到 Stage 施工階段工具列內，利用鍵盤的上下移動切換施工階段，在模型空間上會即時顯示各施工階段的模型。

程式預設的變形顯示比例過大時，使用者可變更調整顯示比例。

Stage 表單 **Stage 6**

Result 表單 > Deformations > **Deformed Shape**

Load Cases/Combinations > **CS:Dead Load**

Components > **DXYZ**; Type of Display > **Undeformed (on)**; **Legend (on)**

Deform > Deformation Scale Factor **(0.5)**

Values > Value Output Details

Decimal Points > **(4)** ; **MinMax Only (on)** ; **Min & Max (on)**

Stage/Step Real Displ. (on) 階段/步數實際總位移

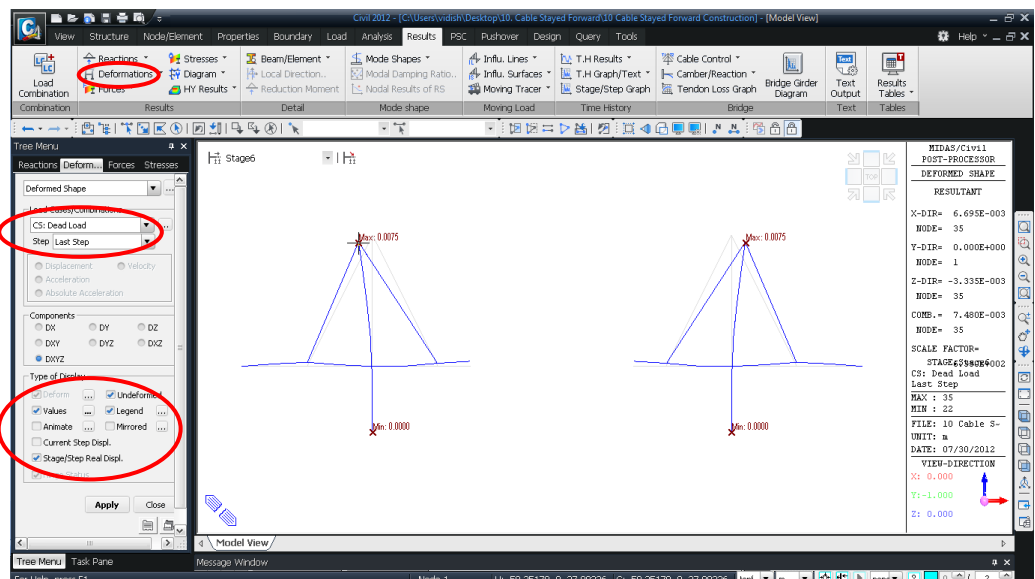


圖 66 順施工階段分析中各施工階段的變形形狀

查看彎矩

查看加勁主梁和主塔在各施工階段的彎矩。

Result 表單 > Forces >  **Beam Diagrams**

Stage Toolbar>**Stage 10**

Load Cases>Combinations>**CS:Summation**

Components>**My**

Display Options>**5Points; Solid Fill**

Type of Display>**Contour (on); Legend (on)**

Values  > Value Output Details

Decimal Points > **(3)** ; **MinMax Only (on)** ; **Min & Max (on)**

↵

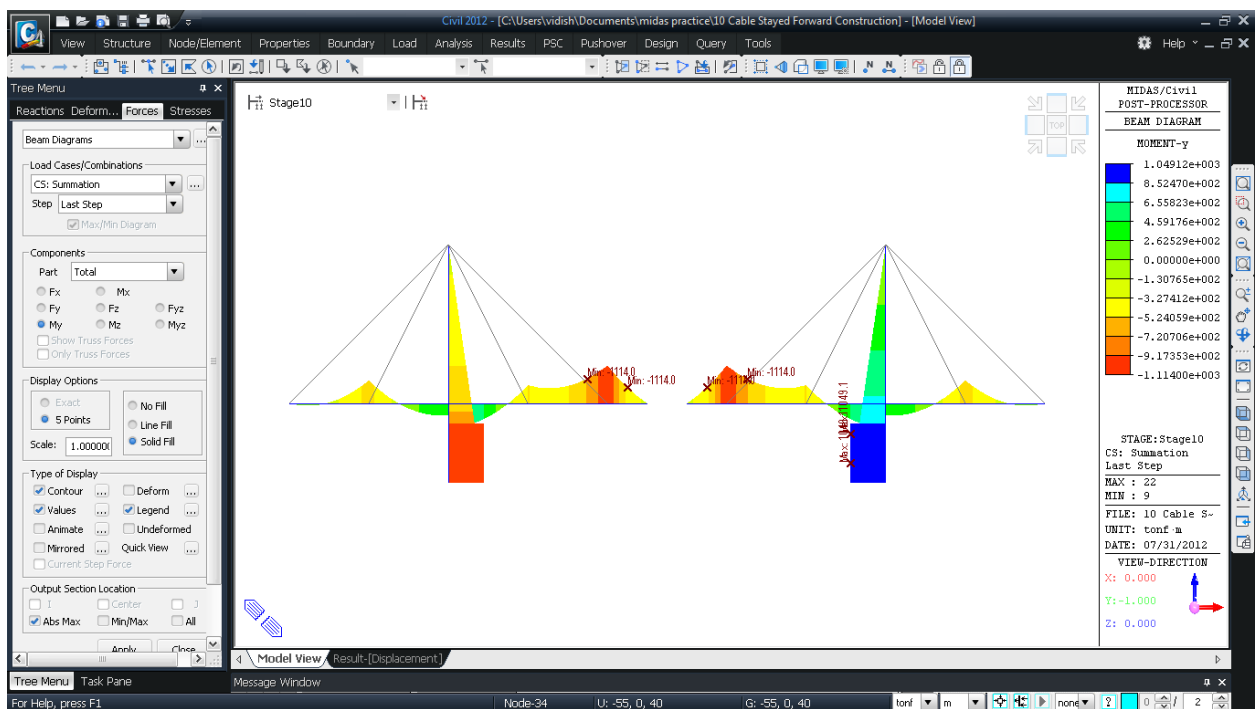


圖 67 順施工階段分析中各施工階段的彎矩圖

查看軸力

查看拉索在各施工階段的軸力。

Results 表單 > Forces >  **Truss Forces**
 Load Cases/Combinations > **CS: Summation**
 Force Filter > **All**; Type of Display > **Legend** (on)
 Values  > Value Output Details
 Decimal Points > **(3)** ; MinMax Only (off)
 Output Section Location > **Max** (on)
 Stage Toolbar > **Stage 10** ↙

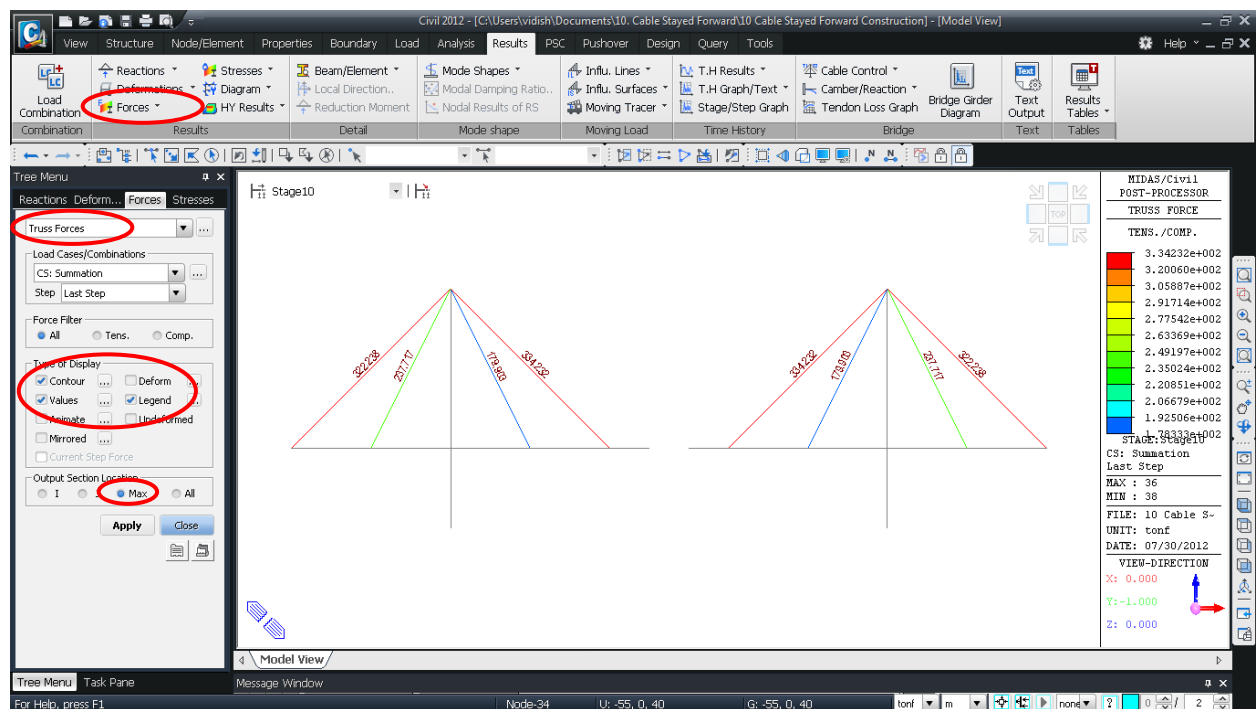


圖 68 順施工階段分析中各施工階段的構件軸力變化

查看計算未閉合配合力時的節點位移和內力值

查看各施工階段的 Lack-of-Fit Force 未閉合配合力計算時採用的節點位移和內力。

Results/Result Tables / Construction Stage / Lack of Fit Force (Truss)

Elem	Node I	Node J	Pretension (tonf)	LOF Force (tonf)	SUM (tonf)	Local Vector			Angle (deg)	Elasticity (tonf/m²)	Area (m²)	I-Node Disp.		
						V-X	V-Y	V-Z				DX (m)	DY (m)	DZ (m)
33	34	1	333.808	-7.153	326.655	-0.707	-0.000	-0.707	45.000	15700000.0	0.005	-0.004	0.000	-0.003
34	34	3	254.370	0.120	254.490	-0.447	-0.000	-0.894	63.435	15700000.0	0.005	0.001	0.000	-0.001
35	34	7	193.011	51.611	244.622	0.447	-0.000	-0.894	63.435	15700000.0	0.005	-0.029	0.000	-0.002
36	34	9	340.835	179.826	520.661	0.707	-0.000	-0.707	45.000	15700000.0	0.005	-0.048	0.000	-0.005
37	35	13	340.835	179.826	520.661	-0.707	-0.000	-0.707	45.000	15700000.0	0.005	0.048	0.000	-0.005
38	35	15	193.011	51.611	244.622	-0.447	-0.000	-0.894	63.435	15700000.0	0.005	0.029	0.000	-0.002
39	35	19	254.370	0.120	254.490	0.447	-0.000	-0.894	63.435	15700000.0	0.005	-0.001	0.000	-0.001
40	35	21	333.808	-7.153	326.655	0.707	-0.000	-0.707	45.000	15700000.0	0.005	0.004	0.000	-0.003

圖 69 各施工階段的 Lack-of-Fit Forces 計算時採用的節點位移和內力

成橋階段分析和順施工階段分析結果比較

比較成橋階段分析和順施工階段分析的吊索張力、加勁梁撓度與彎矩。表 8 為吊索張力的比較結果。

表 8. 吊索張力比較

Element	Cable Pretension (Final Stage)		Cable Pretension (Forward Analysis)		Difference (%)	
	I	J	I	J	I	J
33	316.875	315.305	317.833837	316.263837	-0.3	-0.3
34	236.369	234.799	237.019938	235.449938	-0.27	-0.28
35	192.503	190.933	192.255350	190.685350	0.13	0.13
36	344.595	343.025	344.429928	342.859928	0.05	0.05
37	344.595	343.025	344.429928	342.859928	0.05	0.05
38	192.503	190.933	192.255350	190.685350	0.13	0.13
39	236.369	234.799	237.019938	235.449938	-0.27	-0.28
40	316.875	315.305	317.833837	316.263837	-0.3	-0.3

*Results > Result Tables > Truss > Force

表 9 為比較成橋階段分析和順施工階段分析的加勁梁位移。

表 9. 加勁梁位移比較

Node	Final Stage (mm)	Forward (mm)	Difference (%)
1	10.000	10.000000	0
2	6.902	6.948079	-0.66
3	4.710	4.781067	-1.49
4	1.948	2.002837	-2.74
5	-0.622	-0.622735	-0.12
6	-3.512	-3.601951	-2.5
7	-5.752	-5.943714	-3.23
8	-7.958	-8.244365	-3.47
9	-9.752	-10.109299	-3.53
10	-11.898	-12.292120	-3.21
11	-12.270	-12.668544	-3.15
12	-11.898	-12.292120	-3.21
13	-9.752	-10.109299	-3.53
14	-7.958	-8.244365	-3.47
15	-5.752	-5.943714	-3.23
16	-3.512	-3.601951	-2.5
17	-0.622	-0.622735	-0.12
18	1.948	2.002837	-2.74
19	4.710	4.781067	-1.49
20	6.902	6.948079	-0.66
21	10.000	10.000000	0

*Results > Result Tables > Displacement (Real Displacement)

表 10 為比較成橋階段分析和順施工階段分析的加勁梁彎矩。

表 10. 加勁梁彎矩比較

Node	Final Stage (tonf-m)	Forward (tonf-m)	Difference (%)
1	0.00	0.00	-
2	267.82	263.16	1.74%
3	-392.35	-401.67	-2.38%
4	117.82	109.39	7.19%
5	-300.00	-307.55	-2.53%
6	214.00	211.20	1.31%
7	-200.00	-198.06	0.98%
8	164.00	168.83	-2.96%
9	-400.00	-392.27	1.94%
10	528.00	535.73	-1.47%
11	644.00	651.73	-1.20%
12	528.00	535.73	-1.47%
13	-400.00	-392.27	1.94%
14	164.00	168.83	-2.96%
15	-200.00	-198.06	0.98%
16	214.00	211.20	1.31%
17	-300.00	-307.55	-2.53%
18	117.82	109.39	7.19%
19	-392.35	-401.67	-2.38%
20	267.82	263.16	1.74%
21	0.00	0.00	-

*Results > Result Tables > Beam > Force (My)