

## 波形鋼腹板預力箱型梁複合橋結構行為之分析與探討

### Study on Structure Behavior of Prestressed Box Girder with Corrugated Steel Web

陳盈如<sup>1</sup> 洪曉慧<sup>2</sup> 宋裕祺<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士生(E-mail: [alen547@hotmail.com](mailto:alen547@hotmail.com))

<sup>2</sup> 國家地震工程研究中心副研究員

<sup>3</sup> 國立台北科技大學土木與防災研究所教授

#### 摘要

波形鋼腹板複合橋係利用波形鋼腹板取代傳統預力混凝土梁之混凝土腹板，可使上部結構輕量化並進而降低傳遞至下部結構之地震力，降低橋柱地震力需求，故對於大跨度跨河橋，此類橋型具有相當之優勢。波形鋼腹板預力箱型梁複合橋除了具備自重輕之特點外，波形鋼腹板的垂直穩定性佳，具高剪力挫屈強度，且波形鋼腹板具有容許沿橋軸向大變形的特性，使得於預力容易有效導入混凝土中。近年來因外置預力及高強度混凝土技術愈趨成熟，波型鋼腹板橋在世界各國之實際應用大幅增加。目前國內也已完成首座波形鋼腹板預力箱型梁複合橋設計，且該橋主梁為三箱室，算是此類橋型之首創。為更進一步瞭解此類橋型之實際結構力學行為，國家地震工程研究中心擬於近期進行波形鋼腹板預力箱型梁之相關性能試驗。為使實驗能順利進行，在實驗之前須先進行理論模型分析。故本文旨在利用有限元素分析軟體 ANSYS v11.0 模擬波形鋼腹板箱型梁的結構行為，於分析模式中考慮幾何非線性及材料非線性以提高分析模擬之精確性，並針對鋼浪腹板受力後之行為加以探討。冀望藉由本研究之分析結果，以利試驗分析之進行及試驗後資料比對。

關鍵字：波形鋼腹板、有限元素分析

#### Abstract

Prestressed box girder with corrugated steel web is a new type of structure. In which, the corrugated steel web is employed to replace web of the traditional concrete box girder. The use of corrugated steel web has many advantages such as light girder, economy cost, artistic appearance, high shear strength and rapid construction. The application of it to practical bridge engineering becomes popular in last decade, the study on its structure behavior is thus important. In this paper, the famous finite element software of ANSYS v11.0 was used for simulation and analysis on structure behavior of corrugated steel web. Effects of geometric and material nonlinear were taken into account. The result of analysis obtained might benefit the proceed of experiment and were compared with those data.

Keywords: corrugated steel web、FEM

## 一、前言

一般橋梁型式多採用混凝土箱梁，此種形式不僅增加橋梁自重，也使跨距縮減，為解決此種較不經濟的型式，發展出一套由鋼板取代混凝土腹板的型式，在 1986 年，法國便以此概念創建了史上第一座以波形鋼腹板代替普通混凝土箱型梁腹板的新型複合橋梁—Cognac 橋。其後，德國與日本也在橋梁工程上應用此種技術於，日本於平成五年〈西元 1993 年〉在新瀉縣建立了日本第一座鋼浪腹板橋梁—新開橋；於平成八年〈西元 1996 年〉在秋年縣又建立了銀山御辛橋。由於國外成功的工程案例，交通部台灣區國道新建工程局便規劃於臺中生活圈 2 號線東段、臺中生活圈 4 號線北段與平面延伸段及大里聯絡道工程，採用鋼浪腹板預力混凝土箱梁複合橋，這是國內首座採用鋼浪腹板的複合橋梁。

鋼浪腹板預力混凝土箱梁是公路橋梁中前瞻性極高的複合橋梁，將其優點整理如下列所示：

1. 使用鋼浪腹板取代混凝土腹板，腹板由厚變薄，可減輕橋梁自重
2. 鋼浪腹板具有極高的抗剪挫屈強度
3. 比起傳統混凝土，鋼浪腹板在施工組裝上更為容易，還能夠省去腹板配置鋼筋及架設模板的作業，提高施工效率縮短工期
4. 鋼浪腹板的特殊幾何，可在施加預力時，使預力有效導入混凝土翼板
5. 鋼浪腹板因為自重較低，可減輕下部結構的負載，進而降低地震力對其之影響

綜合以上優點波形鋼板預力箱型梁渴望成為橋梁結構發展的新趨勢，但關於鋼浪腹板的研 究在台灣可說是相當的少，為了能更加掌握此新型混凝土與鋼複合的橋樑結構之應用，有必要對鋼浪腹板結構之行為進行研究，故近期將於國家地震中心進行波形鋼腹板預力箱型梁之相關性能試驗，本文係利用有限元素軟體 ANSYS v11.0 進行三座試體的穩定分析及一座三箱室的波形鋼腹板預力箱型梁斷面力學試驗，於分析過程中為提高模擬之精確性，將考慮材料非線性及幾何非線性，並針對鋼浪腹板受力後之行為加以探討，希冀藉由本文分析結果，以利試驗分析之進行及實驗資料比對

## 二、波形鋼腹板

### 2.1 波形鋼腹板之力學特性

鋼浪腹板為特殊幾何形狀之波浪形鋼板，其力學特性較一般平面鋼板特殊及多元，包含特有的手風琴效應、受力後應力、應變分布特性、剪力挫屈行為等，其基本配置如圖 1 所示。

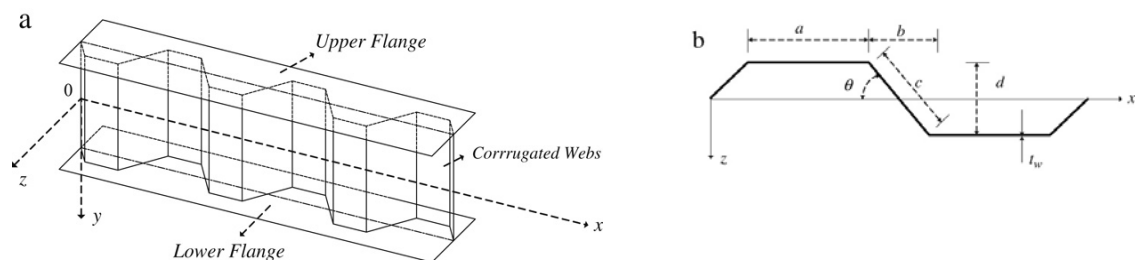


圖 1 鋼浪腹板幾何尺寸示意圖[2]

其中

- a：鋼浪腹板平板之板寬 (mm)
- b：鋼浪腹板斜板之水平投影寬 (mm)
- c：鋼浪腹板斜板之板寬(mm)
- d：鋼浪腹板波高(mm)
- $\theta$ ：鋼浪腹板波角( $^{\circ}$ )
- $t_w$ ：鋼浪腹板厚度(mm)

當鋼浪腹板箱型梁施加預力時，因為鋼浪腹板特殊的幾何形狀，腹板軸向勁度相當低幾乎不承受軸力，容易使預力有效導入混凝土翼板，而鋼浪腹板此種行為就好比拉手風琴一般，故稱其特殊結構行為為「手風琴效應」〈Accordion Effect〉。

另外日本勝保盛等人[1]針對鋼浪腹板預力 I 型梁進行一個試驗，其內容為利用一 I 型梁，頂、底部為混凝土翼板，腹板為鋼浪腹板，並施加集中載重，由實驗結果可得知，頂部混凝土主要承受壓應力其應變為負，底部混凝土為拉應力其應變為正，而鋼浪腹板部分的應變值幾乎趨近於零，由此證明彎矩以及軸力多由頂、底混凝土翼板承受。

波形鋼腹板中的應力狀態接近於純剪力行為，具有極高剪力強度及挫屈強度，在作為混凝土箱梁腹板的同時並可滿足其腹板力學特性，並可透過調整波形鋼腹板的波高來改變其抗剪的挫屈強度，配合混凝土翼板承受大多的彎矩應力，可充分發揮整體力學效率。

## 2.2 波形鋼腹板挫屈計算式

波形鋼腹板之彈性挫曲是由平板挫曲衍生而來的，大致可區分為三種形式，分別是(1)局部挫曲、(2)整體挫曲及(3)合成挫曲[2]，以下說明各計算式之內容：

(1)局部剪力挫屈

$$\tau_{cr,L}^e = k_L \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{w} \right)^2 \quad (1)$$

$$k_L = 5.34 + 4 \left( \frac{w}{h_w} \right)^2 \quad (2)$$

(2) 整體剪力挫屈

$$\tau_{cr,G}^e = k_G \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_w} \right)^2 \quad (3)$$

$$k_G = \frac{36\beta}{\pi^2 \sqrt{\eta}} \left[ 2 \left( \left( \frac{d}{t_w} \right)^2 + 1 \right) (1-\nu^2) \right]^{3/4} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{(a+b)}{(a+c)} \quad (5)$$

(3) 合成剪力挫屈

當整體與局部剪力挫屈同時作用時，其挫屈強度則為合成剪力挫屈強度，該強度與整體剪力挫屈及局部剪力挫曲強度相關

$$\tau_{cr,I}^e = k_I \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_w} \right)^2 \quad (6)$$

$$k_I = \frac{k_L k_G}{k_L + k_G \left( \frac{w}{h_w} \right)^2} \quad (7)$$

其中

$E$ ：鋼浪腹板彈性模數(kgf/mm<sup>2</sup>)

$h_w$ ：鋼浪腹板高度(mm)

$\nu$ ：鋼浪腹板柏森比

$w$ ：鋼浪腹板平板或斜板之板寬之最大值 (mm)

$\tau_{cr,L}^e$ ：鋼浪腹板局部剪力挫屈強度(kgf/mm<sup>2</sup>)

$k_L$ ：局部挫屈係數

$\tau_{cr,G}^e$ ：鋼浪腹板整體剪力挫屈強度(kgf/mm<sup>2</sup>)

$k_G$ ：整體挫屈係數

$\beta$ ：整體挫屈因子，與邊界條件有關；簡支梁通常用 1

$\tau_{cr,I}^e$ ：波形鋼浪腹板彈性合成剪力挫屈強度(kgf/mm<sup>2</sup>)

$k_I$ ：合成挫屈係數

若考慮鋼板之材料非線性，則波形鋼浪腹板之非彈性挫屈強度之公式如下，

$$\frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \begin{cases} 1 & \lambda_s < 0.6 \\ 1 - 0.614(\lambda_s - 0.6) & 0.6 \leq \lambda_s < \sqrt{2} \\ 1/\lambda_s^2 & \lambda_s \geq \sqrt{2} \end{cases} \quad (8)$$

其中， $\lambda_s$  為剪力挫曲參數，鋼板降伏剪應力  $\tau_y$  與波型鋼浪腹板彈性合成剪力挫屈強度  $\tau_{cr,I}^e$  相關

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{\tau_y}{\tau_{cr,I}^e}} \quad (9)$$

降伏剪應力  $\tau_y$  可定義如下[2]

$$\tau_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \approx 0.58 f_y \quad (10)$$

式中  $f_y$  為鋼浪腹板材料降伏強度

### 三、有限元素模擬及分析

為了解鋼浪腹板的受力行為，將於國家地震工程研究中心進行鋼浪腹板之相關性能試驗，遂以本文先行利用有限元素軟體 ANSYS V11 進行試驗期間的穩定分析及斷面力學行為分析，以便驗證及瞭解其受力行為及儀器觀測之佈設。

### 3.1 穩定試驗

圖 2 為本實驗試體幾何尺寸說明，有別於其他國外試驗配置，為了貼近實際橋梁結構之應用，此試體上下翼板為混凝土，腹板則為波形鋼腹板並貫穿上下翼板與混凝土結合，另外依據鋼浪腹板剪力挫區理論推估，在相同的幾何條件下，波形鋼浪腹板的剪力強度可藉由腹板高度進行調整，是以本試驗共有三座不同腹板高度尺寸之試體，其相關尺寸標示如圖 2 及表 1 所示。

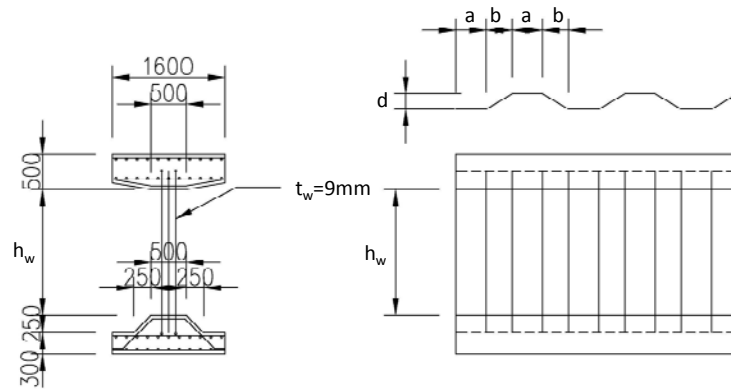


圖2 鋼浪腹板與混凝土穩定試驗之幾何尺寸示意圖(單位：mm)

表 1 鋼浪腹板與混凝土穩定試驗之幾何尺寸

(mm)	a	b	d	$t_w$	$h_w$
試體一	430	370	220	9	1000
試體二	430	370	220	9	1500
試體三	430	370	220	9	1800

本文試體之鋼浪腹板降伏強度為  $f_y=3500\text{kgf/cm}^2$ ，其所對應的降伏剪應力  $\tau_y=20.21\text{kgf/cm}^2$ 。另再依據公式(1)至公式(10)，可求得本研究試體之彈性剪力挫屈強度、彈性整體剪力挫曲強度、彈性剪力合成挫曲強度與非彈性挫曲強度。

依據理論公式計算，其結果如表 2 所示，試體一、二、三之非彈性剪力挫屈強度分別為  $19.51\text{kgf/mm}^2$ 、 $19.01\text{kgf/mm}^2$ 、 $18.78\text{kgf/mm}^2$ ，計算結果顯示剪力挫屈強度會隨著鋼浪腹板高度的增加而降低。除理論計算外，並利用有限元素軟體 ANSYS，針對三座試體進行實驗之模擬及分析。分析模型如圖 4 所示，其中混凝土元素使用彈性之 solid65 元素模擬，它為一個 3-D 實體元素共有八個節點，每個節點具有三個自由度，採用強度為  $f'_c=420\text{kgf/cm}^2$  之混凝土，其所對應之彈性模數為  $E=3074.09\text{kgf/mm}^2$ ，蒲松比  $\nu=0.3$ 。鋼浪腹板元素以非彈性 shell181 元素模擬，採用彈性模數  $E=2.04 \times 10^4\text{kgf/mm}^2$ ，蒲松比  $\nu=0.2$ ，而鋼浪腹板組成律大致與鋼筋相似可分為彈性階段、塑性階段與應變硬化階段，根據 Mirza 與 MacGregor[6]於 1979 所提之建議如圖 3 所示。

表 2 試體剪力挫屈理論計算結果

	試體一 ( $h_w = 1000\text{mm}$ )	試體二 ( $h_w = 1500\text{mm}$ )	試體三 ( $h_w = 1800\text{mm}$ )
$k_L$	6.081	5.669	5.569
$\tau_{cr,L}^e$ ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	49.012	45.694	44.882
$k_G$	717.28	717.287	717.287
$\tau_{cr,G}^e$ ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	1071.124	476.105	330.628
$k_I$	31.382	62.812	85.733
$\tau_{cr,I}^e$ ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	46.868	41.692	39.518
$\lambda_s$	0.657	0.696	0.715
$\tau_{cr}$ ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	19.505	19.014	18.779

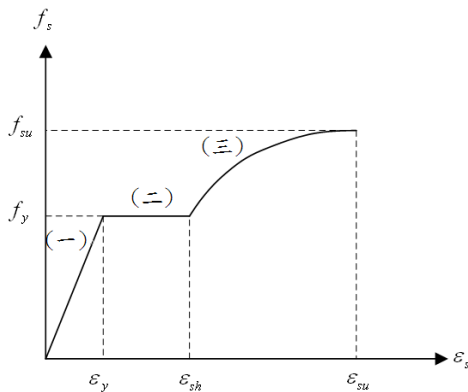


圖3 鋼材之應力應變曲線

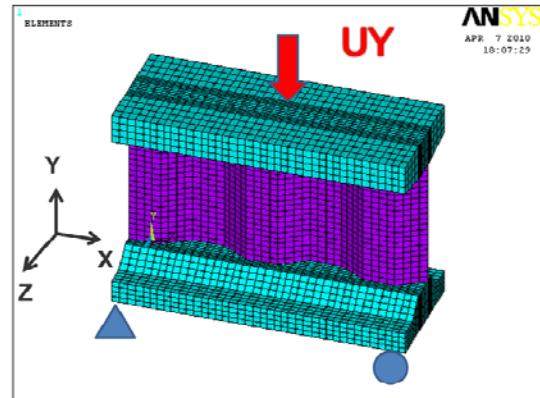


圖4 穩定試驗有限元素模型

分析模型之邊界條件為簡支梁型式如圖 4 所示，在  $X=0 \sim X=470$  處為鉸支承，在  $X=3530 \sim X=4000\text{mm}$  處為滾支承，分析採位移控制，於試體中心線上逐步增加垂直位移，直至試體分析達到無法收斂為止，分析結果繪於圖 5。圖中所示為試體中點處 ( $X=2000\text{mm}$ ) 垂直位移和剪應力關係圖，如圖所示，隨著鋼浪腹板高度之增加，剪力挫屈強度逐漸降低，試體一、二、三的剪力挫屈強度分別為  $33.70 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 、 $22.11 \text{ kgf}/\text{mm}^2$  和  $18.05 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 。茲亦將各試體剪力挫屈強度之模擬分析結果與對應之試驗所需軸力列於表 3。如表所示，各試體試驗所需之最大垂直力分別為  $606.54 \text{ tonf}$ 、 $596.95 \text{ tonf}$  和  $584.79 \text{ tonf}$ 。

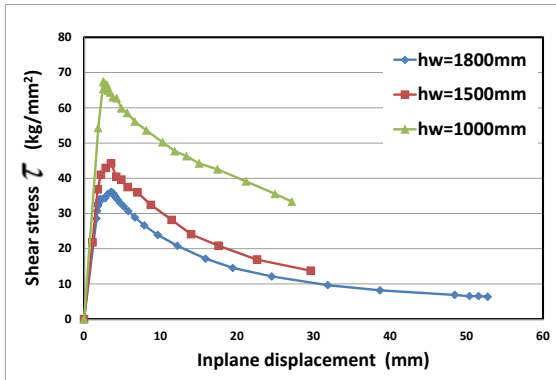


圖5 中點垂直位移與剪應力關係圖

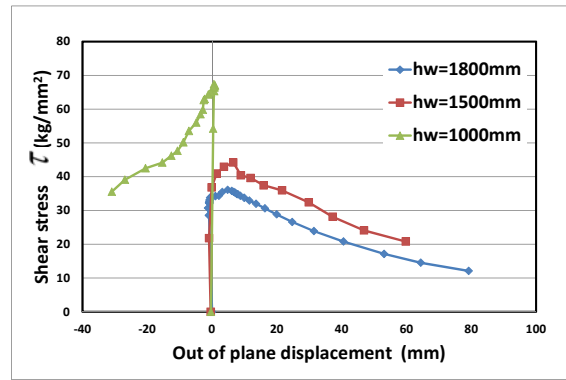


圖6 面外位移與剪應力關係圖

表 3 試體之非彈性剪力挫屈強度與試驗所需之最大垂直外力

	試體一 ( $h_w = 1000\text{mm}$ )	試體二 ( $h_w = 1500\text{mm}$ )	試體三 ( $h_w = 1800\text{mm}$ )
$P$ (tonf) 束制端反力總和	606.54	596.95	584.79
$\tau_{cr}$ (kg/mm <sup>2</sup> ) 分析計算值	33.697	22.109	18.049

其中以試體一 ( $h_w=1000\text{mm}$ ) 之分析結果為代表，輸出試體達挫屈強度時之變形圖與剪力分布圖則分別繪於圖 7 與圖 8，。如圖所示，試體之最大變形均發生在兩側受邊界束制之位置，即在  $X=0 \sim X=470\text{mm}$  處與  $X=3530 \sim X=4000\text{mm}$  處上方之鋼板有應力集中現象，其中因為試體為非對稱關係，於  $X=3530 \sim X=4000\text{mm}$  之應力會較大。

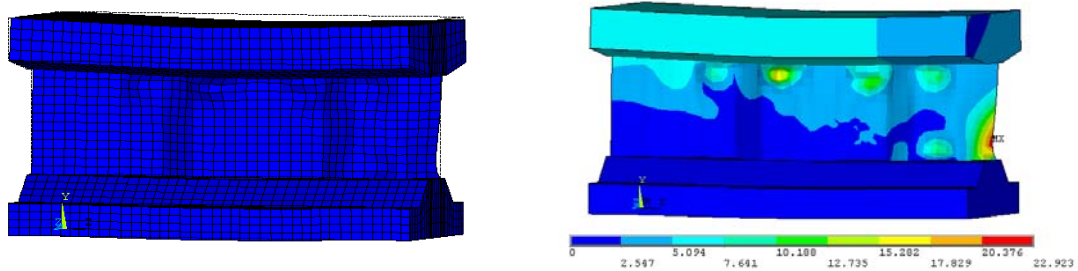


圖 7 試體一 ( $h_w=1000\text{mm}$ ) 於最大剪應力時之變形

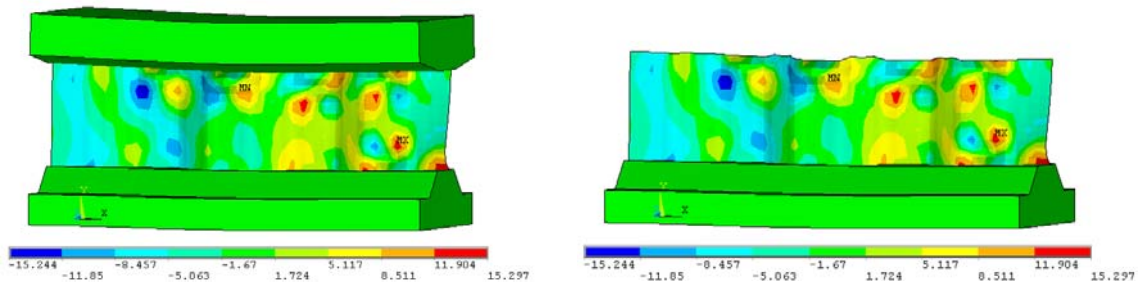


圖 8 試體一 ( $h_w=1000\text{mm}$ ) 於最大剪應力時之剪應力分布圖

### 3.2 斷面力學行為試驗

本試體為簡支梁，採三箱式波形鋼浪板造型，淨跨度 14m、寬度 5.7m、腹板橫向間距 1.5m。波形鋼腹板之波形配置與與穩定試驗試體相同；試體以外置預力鋼纜方式施加縱向預力，以位移控制施加垂直力，直至試體達到預期變形量時停止，其試體尺寸如圖 9 所示。

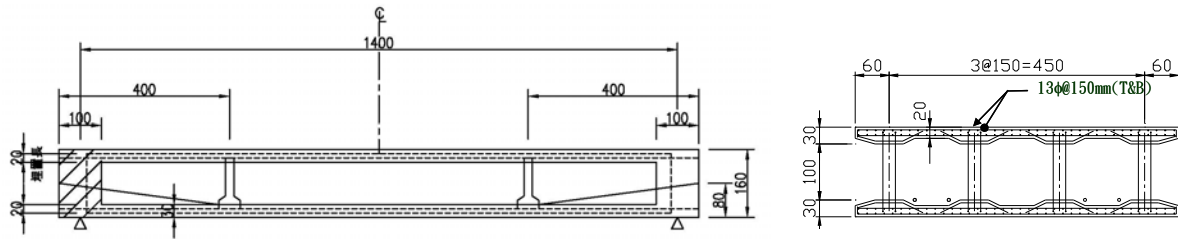


圖9 斷面力學行為試驗試體(單位：cm)

首先依據簡易預力梁分析方法，針對本試體進行初步分析。依據圖 9 之斷面，若忽略鋼板之抗彎強度，可得本試體斷面 I 值=1.317 m<sup>4</sup>，斷面積 A=2.9068 m<sup>2</sup>，自重產生之最大彎矩 MD=180 tonf-m。假設混凝土開裂應力  $\sigma_r = 2.0\sqrt{f'_c} = 41 \text{ kgf/cm}^2$  ( $f'_c = 420\text{kgf/cm}^2$ )，則混凝土開裂彎矩  $M_r = \sigma_r I_y / y = 675 \text{ tonf-m}$ 。依此開裂彎矩，假設外力作用於如圖 10 所示之梁中心點，其中跨距 L=14m，則可求得若梁未施拉預力，當中點垂直外力達 P=141 tonf 時，梁底會達開裂彎矩。另一方面，若梁施加偏心為 e=0.5m 之預力 F=360 tonf，則當中點垂直外力達 P=250 tonf 時，梁底會達開裂彎矩。另假設預力鋼鍵為 4-7T-15.2mm  $\phi$  (斷面積  $A_s=39.2\text{cm}^2$ )，極限拉力強度為 16000 kgf/cm<sup>2</sup>；拉力鋼筋為雙層 13  $\phi$  @150mm (斷面積  $A_s=96 \text{ cm}^2$ )，極限拉力強度為 2800kgf/cm<sup>2</sup>，則可推算極限彎矩 Mu=1191 tonf-m，中間節點加力至 P=280 tonf 時彎矩 達極限彎矩強度 Mu。

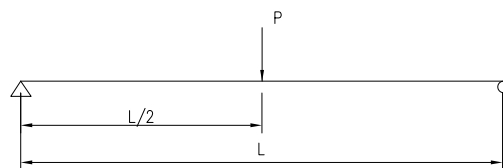


圖 10 斷面力學行為試驗模擬分析示意圖

本試體亦利用 ANSYS 有限元素分析軟體，針對斷面力學行為試體進行試驗之模擬分析。分析模型繪於圖 12，其中混凝土元素以非彈性之 solid65 元素模擬，對應於強度為  $f'_c=420\text{kgf/cm}^2$  之 Mander 圍束混凝土，其應力-應變曲線繪於圖 11。鋼浪腹板元素以非彈性之 shell 181 元素模擬，其應力-應變曲線與圖 3 相同。

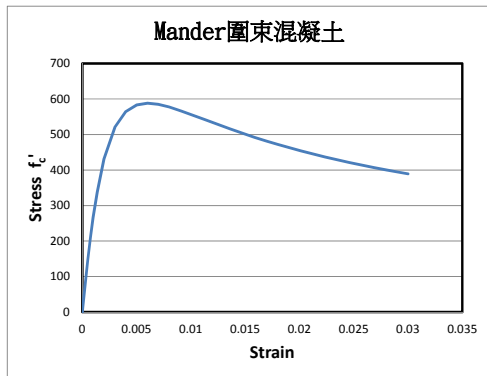


圖 11 混凝土之應力—應變曲線

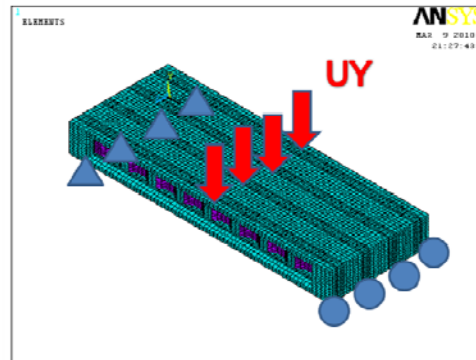


圖 12 斷面力學行為試驗

分析模型之邊界條件為在  $X=250\sim 500\text{mm}$  處為鉸支承，在  $X=14250\sim 14750\text{mm}$  處為滾支承，若預力以外力型式施加，暫不考慮拉力鋼筋與預力鋼鍵之強度貢獻，分析採位移控制，逐步增加試體中心線上之垂直位移，直至試體達極限破壞為止，分析結果繪於圖 13。如圖所示，當垂直外力達 230 tonf 時，試體達極限破壞。

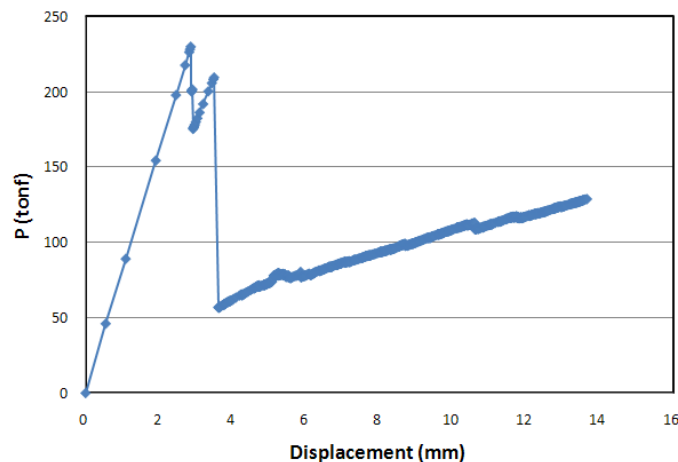


圖 13 有限元素分析所得之試體中點之位移—力曲線

在經過簡易的分析後，透過文獻的閱讀及不斷的嘗試，針對斷面力學分析模擬預力的形式進行修正。根據 P. Fanning[5]所建議，對於鋼筋混凝土所採用的元素—solid65 與本文相同，而在有預拉力的鋼筋混凝土模型中鋼筋的模擬是採用整體式模型，一般鋼筋混凝土則採用分離式模型，其整體式模型中相關的鋼筋參數設定皆附於混凝土元素之中。

此修正模型共使用三種元素模擬，分別為混凝土、鋼腹板及預力鋼鍵，其中預力鋼鍵以彈性之 Link8 元素模擬，其所對應之彈性模數為  $E=3074.09\text{kgf/mm}^2$ ，蒲松比=0.3；鋼浪腹板則以非彈性之 shell 181 元素模擬，其應力-應變曲線與圖 3 相同，混凝土元素以非彈性之 solid65 元素模擬，其對應於強度為  $f'_c=420\text{kgf/cm}^2$  之 Mander 圍束混凝土，另在參數設定中設置鋼筋之主筋方向與體積比。

分析模型之邊界條件一樣在  $X=250\sim 500\text{mm}$  處為鉸支承，在  $X=14250\sim 14750\text{mm}$  處為滾支承，其中因為忽略混凝土轉向塊的模擬，便於主要的預拉力高度，也就是距底部混凝土 30cm 的地方以元素 Link8 模擬預力，水平錨定至兩端的混凝土，但不考慮鋼鍵與混凝土滑移的問題。

本文擬採用溫度控制來模擬預力鋼鍵所施加之預力，圖 14 及圖 15 為預力作用後的變形圖及跨中軸向應變與梁深之關係。

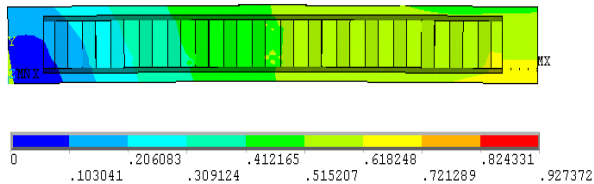


圖 14 預力作用下整體變形圖

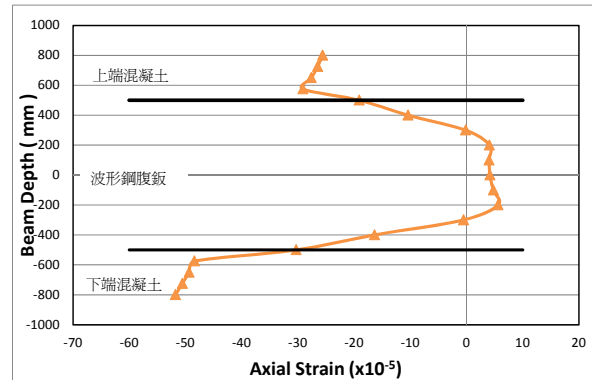


圖 15 預力作用下軸向應變圖

#### 四、結論

在穩定試驗分析後將該剪力挫屈值與公式計算結果相比略有差異，但從數值上可觀察發現分析之剪力挫屈值與腹板高度有關，其結果與理論相符；另外在斷面力學分析中，因為有限元素分析尚未考慮鋼筋與鋼鍵之強度貢獻，故其極限狀態等同於混凝土達開裂應力之狀態，該值也近似於依據預力梁分析方法計算所得之開裂彎矩所對應之垂直力，另外在最後修正的模型中，可發現在施加預力後腹板的軸向應變比混凝土小；但就分析所得之結果，其差異性與正確性尚待試驗完成後作進一步之比較與檢討。

#### 參考文獻

- [1] 勝侯盛，溝江慶久，町田文孝，越後「滋波形鋼板ウェブの耐久性を探る」，川田技報，第 19 卷，第 80-81 頁
- [2] Jiho Moon, Jongwon Yi, Byung H. Choi, Hak-Eun Lee, "Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs," *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 1198-1205, 2009.
- [3] Jongwon Yi, Heungbae Gil, Kwangsoo Youm, Hakeun Lee, "Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs," *Engineering Structures*, pp. 1659-1666, 2008.
- [4] Robert G. Driver, M.ASCE, Hassan H. Abbas, A.M.ASCE, Richard Sause M.ASCE, "Shear Behavior of Corrugated Web Bridge Girders," *Journal of Structural Engineering*, pp. 195-203, 2006.
- [5] P. Fanning, "Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams," *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 2, pp.111-119, 2001.
- [6] S.A. Mirza, J. G. MacGregor, "Variability of Mechanical Properties of Reinforcing Bars," *ASCE Journal of the structural Division*, Vol. 105, NO. 5, pp.921-937, 1979.
- [7] Timoshenko SP, Gere JM., "Theory of elastic stability," 2nd edition. NY: McGraw-Hill Publishing Co.; 1961
- [8] 林紹傑，「預鑄節塊外置預力橋墩之耐震行為分析」，碩士論文，國立台北科技大學土木與防災研究所，宋裕祺指導，2008。
- [9] 徐誌隆，「鋼浪腹板外置預力橋結構行為之分析與探討」，碩士論文，國立台北科技大學土木與防災研究所，宋裕祺指導，2008。