

# 人形吊橋工程事故原因探討

## -以基隆暖暖溪人行吊橋為例

\*陳雅綸 (Ya-Lun Chen)  
中國科技大學建築系碩士生

張哲翔(Che-Hsiang Chang)  
中國科技大學建築系碩士生

### 摘要

人行吊橋帶有經典的建築之美，也經常成為熱門旅遊勝地，吸引大量人群前來觀光、體驗。近年來，國內外發生多起人行吊橋倒塌事故，導致嚴重的人員傷亡，這使得對人行吊橋的研究變得更加重要和迫切。本研究針對基隆暖暖溪人行吊橋為例，旨在探討人行吊橋施工中的結構安全、施作流程和材料等方面的問題，分析現有的安全問題及不足之處，並提出相應的改進措施，以提高人行吊橋的安全性和可靠性。針對暖暖溪人行吊橋應舊所有基本資料等作通盤檢討，根據施工方法及施工機具參照當地之環境及條件限制，擬定施工進度表。

關鍵字：懸索橋，橋塔，主索，垂吊索

## Discussion on the causes of human-shaped suspension bridge engineering accidents: A case study of Keelung Nuannuanxi pedestrian suspension bridge Summary

The pedestrian suspension bridge has the beauty of classic architecture and often becomes a popular tourist attraction, attracting a large number of people to come to see and experience. In recent years, there have been many pedestrian suspension bridge collapse accidents at home and abroad, resulting in serious casualties, which makes the research on pedestrian suspension bridges more important and urgent. This study aims to explore the structural safety, implementation process and materials of the pedestrian suspension bridge in the construction of the Keelung Nuannuanxi pedestrian suspension bridge, analyze the existing safety problems and shortcomings, and propose corresponding improvement measures to improve the safety and reliability of the pedestrian suspension bridge. For the Nuan Nuan Xi pedestrian suspension bridge, all the basic information should be reviewed comprehensively, and the construction

schedule was drawn up according to the construction methods and construction tools with reference to the local environment and conditions.

**keywords:** suspension bridge, bridge towers, main cable, hanging slings

## 一、前言

吊橋(Suspension Bridge)是一種古老而實用的橋樑結構，最早可以追溯到古代，當時人們用樹木、植物纖維和石塊建造懸索橋。在歷史上吊橋也常被用於越過山谷、深淵或峽谷。現代吊橋的設計和建造方式也不斷在進步，成為了現代工程學的一個重要組成部份。吊橋主要由主纜、塔柱和橋面組成。主纜承受橋面的重量，分散至塔柱，塔柱作為主纜固定點支撐起結構形成拱形，橋面由懸索連接至主纜，保證穩定。吊橋承重原理來自牛頓(Sir Isaac Newton)第三定律，力在主纜和橋面間互相作用達到平衡。設計吊橋考慮的因素 1. 地形和環境，包括河流的寬度、河岸的高度和傾斜度等。此外還需考慮地震、風暴、颱風等自然災害。這些因素都會影響吊橋的設計和建造，需要考慮到安全性和壽命。2. 負載和材料，負載包括行人、車輛和其他載重，這些負載必須在吊橋的設計和建構中得到考慮。此外，材料的選擇也是極為重要的，橋梁需要使用耐久性、抗腐蝕、抗壓和經濟性等之材料。

吊橋的建造需要高度的技術和專業知識，在施工過程中必須嚴格遵守安全規範和程式。首先，必須確定吊橋的設計和施工計畫，包括建造階段各種工作步驟和時間表，其次必須確保所使用材料符合標準和要求在搭建起重機時必須注意起重機的穩定性和安全性。在懸吊和固定吊索時必須確保牢固。

基隆暖暖溪吊橋(Nuan Nuanxi Suspension Bridge)是一座著名的吊橋，位於台灣新北市瑞芳區，它跨越暖暖溪谷連接兩邊的山脊，提供壯觀的自然景色和迷人的徒步體驗。暖暖溪吊橋是一座懸索橋，長約 150 米，高約 50 米，是台灣最長的人行吊橋之一。它採用鋼索和鋼橋面結構，提供安全的通行方式。

## 二、文獻回顧

### 2.1 懸索橋(橋梁類型之一)

懸索橋，又名吊橋(suspension bridge)指的是以通過索塔懸掛並錨固於兩岸(或橋兩端)的纜索(或鋼鏈)作為上部結構主要承重構件的橋樑。其纜索幾何形狀由力的平衡條件決定，一般接近拋物線。從纜索垂下許多吊桿，把橋面吊住，在橋面和吊桿之間常設定加勁梁，同纜索形成組合體系，以減小荷載所引起的撓度變形。懸索橋的原理懸索橋中最大的力是懸索中的張力和塔架中的壓力。由於塔架基本上不受側向的力，它的結構可以做得相當纖細，此外懸索對塔架還有一定的穩定作用。假如在計算時忽視懸索的重量的話，那麼懸索形成一個拋物線。這樣計算懸索橋的過程就變得非常簡單了。老的懸索橋的懸索一般是鐵鏈或聯在一起的鐵棍。現代的懸索一般是多股的高強鋼絲。

## 2.2 懸索橋的結構與性能

懸索橋的構造方式是19世紀初被發明的，許多橋樑都使用這種結構方式。懸索橋是以承受拉力的纜索或鏈索作為主要承重構件的橋樑，由懸索、索塔、錨碇、吊桿、橋面系等部分組成。懸索橋的主要承重構件是懸索，它主要承受拉力，一般用抗拉強度高的鋼材（鋼絲、鋼纜等）製作。由於懸索橋可以充分利用材料的強度，並具有用料省、自重輕的特點，因此懸索橋在各種體系橋樑中的跨越能力最大，跨徑可以達到1000米以上。

## 三、懸吊橋力學行為

### 3.1 塔橋受力行為

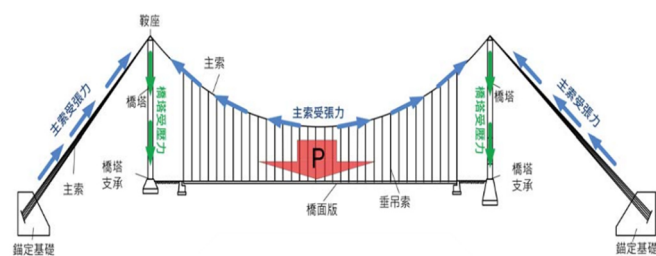


圖1 吊橋構件與力量傳遞行為

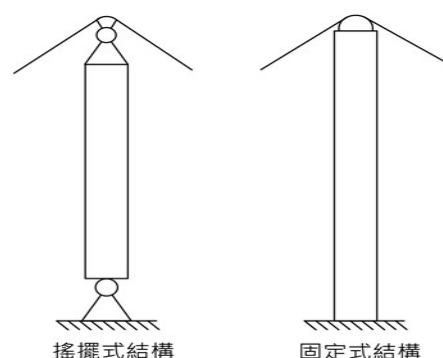


圖2 塔橋結構形式

行人載重  $P$  施加(如圖 1) 於橋面版，透過垂吊索傳遞至主索，主索受拉力，索力在跨中最低點處最小，在鞍座處最大，一部分力量 透過橋塔傳遞到橋塔基礎，另一部分則由錨碇基礎承受。橋塔主要承受軸壓力而錨碇基礎需抵抗來自主索的拉力，換言之，吊橋是以鋼索傳遞力量，而結構系統的穩定性則仰賴橋塔與錨碇端，在材料無損傷的情況下，當橋塔傾斜過大或錨碇端無法承受主索拉力而失去平衡時，便會導致結構失效。

橋塔依照支承種類可分成搖擺式與固定式兩種結構形式，(如圖 2) 所示，其目的是使橋塔僅承受軸壓力，避免承受過大彎矩。搖擺式結構橋塔與基礎間採用鉸接支承，可自由轉動，此類型結構橋塔受主索變形帶動而產生傾斜，因此鞍座需採用固定式設計，即主索與鞍座間不允許產生相對位移，否則可能造成橋塔傾倒；固定式結構橋塔與基礎為固接，因此鞍座採用滑動式設計，主索可在鞍座上自由滑動，並使主索 與鞍座間的摩擦力降到最低，避免摩擦力在橋塔底部產生過大的彎矩。

### 3.2 索力

吊橋的容許拉力通常為 0.45 倍的極限拉力，以避免產生過大的鬆弛量。主索索力隨位置改變，最大索力發生於鞍座處。(如圖 3) 由傾斜量對照關係曲線即可得知主索的受力狀況，在分析時應特別留意。

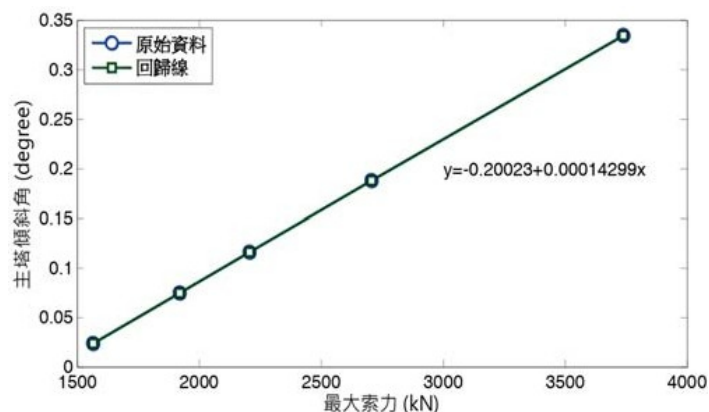


圖3 最大索力與塔橋傾斜關係圖

#### 四、暖暖溪人行吊橋工程事故

1. 暖暖溪人行吊橋本體工程於4月17日時已完成上部主體吊掛完成，包含橋塔、主索、垂吊索、橋面板結構、橋面板鋪面、抗風索、抗風支索及安全護欄等構件吊掛及組裝，吊橋本體完成約達95%，並預定於4月18日進行主索吊掛及組裝垂度及橋面拱度調整，尚餘安全護欄調整、收邊及出入口平台安裝(照片1~2)。
2. 於4月18日上午十一點四十分進行主索垂度及橋面拱度調整完成後，因疑似作業疏失未校正橋塔偏斜度且未能有效固定橋塔上方之主索跨座，造成橋塔主索滑動以致鋼構橋塔向前傾斜，並於4月19日發生吊橋主體垂降現象，進而主索HDPE披覆呈現滑動波紋約2M並局部破損，入口兩端橋體變形，部分橫縱樑破損，部分垂吊索及抗風支索損壞(照片3~4)。
3. 目前工地已於4月19日進行橋體上部結構拆除作業，包含橋面板結構、橋面板鋪面、垂吊索及夾具、安全護欄、抗風索、抗風支索及夾具等構件，並於拆卸時未有效拉固橋塔，導致橋塔繼續向前方傾斜，其傾斜角度過大超過活動式基座原受力強度，致使活動式基座局部破裂，目前暫時存放於工地現場以備查驗。
4. 經吊橋專業技師於4月28日至現場會勘(如，判定橋塔基礎、左岸主索錨錠基礎、右岸主索錨錠基礎及抗風索基礎等橋體下部結構應未損壞。經勘查現場兩條主索HDPE披覆均呈現約1~2M滑動波紋且局部披覆材料破損鋼索外露，研判原因如下：
  - A. 吊橋上部結構施工廠及商未將柱頂跨座螺栓鎖固。
  - B. 吊橋體組件安裝加載過程所造成之橋塔偏斜度，於橋塔與主索鎖固時並未將鋼構橋塔校正調整至預定垂直角度，致使主索受力不平均造成偏心，以致橋塔傾倒。
 上述原因可能單一或同時發生，以致橋塔傾倒。



照片1



照片2

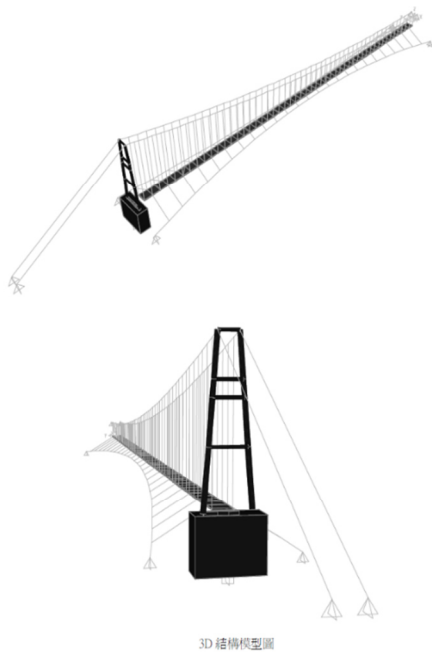


照片3



照片4

## 4.2 吊橋模型建立



### 結構分析結果檢核

#### 1. 鋼樑檢核

縱梁=H100x100x6x8MM  
 $S=77\text{cm}^3$ (鋼結構設計手冊)  
 橫置於懸吊橋樑，假定活載重由4支梁共同承受  
 $W_L=400/4=100\text{kg/m}$   
 $W_D=(0.09*0.04)*1000+(0.04*0.14*2*1000/4)=10.06\text{kg/m}$  取  $20\text{kg/m}$   
 $M_d+L=\frac{1}{8}wL^2=60\text{kg}\cdot\text{m}$   
 $\sigma=MS=60*100/77=77.91\text{kg/cm}^2 < 0.66y=151.2\text{kg/cm}^2$  (容許應力)  OK

#### 2. 鋼樑檢核

橫梁=H150x150x7x10MM  
 $S=219\text{cm}^3$ (鋼結構設計手冊)  
 $W_L=400*1.5*2/2=600\text{kg/m}$   
 $W_D=(0.09*0.04)*1000*4*2+0.04*0.14*2*1000*1.5*200$ (欄杆)= $246\text{kg/m}$   
 $M_d+L=\frac{1}{8}wL^2=846*2^2/8=423\text{kg}\cdot\text{m}$   
 $\sigma=MS=423*100/219=193.1\text{kg/cm}^2 < 0.66y=151.2\text{kg/cm}^2$  (容許應力)  OK

#### 3. 主索張力檢核

本工程採用高耐索，吊索諸元如下表所示。

繩索編號	F100	F100	F100	F100	F100	F100	F100	F100
總長(公尺)	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7
分位	17.8	24.3	28.5	33.3	38.1	43.6	47.8	55.5
單位重量	109.1	277.1	583.9	516.3	691.0	670.9	1104.2	1409.6
單位張力	1.83	2.36	3.94	4.68	5.24	9.82	12.47	17.18
單位張力	1	33.6	40.0	70.0	95.0	226.0	163.6	258.9
單位張力	1	28.3	42.2	97.8	83.3	110.4	126.8	126.2
單位張力	1	11.4	17.3	24.6	33.3	44.2	54.7	66.8
單位張力	1	17.1	25.9	36.9	50.0	66.2	82.0	100.1
單位張力	1	17.1	25.9	36.9	50.0	66.2	82.0	100.1

人行吊橋結構特性為自重甚輕，引索之地震力甚小。經分析載重組合

DL+EQ 及 DL+WL 所得之結果均小於 DL+LL 所得者，因此控制之載重組合為 DL+LL，分析所得之主筋索張力如附錄一所示：

Table with 4 columns: Pu, Mux, Muy, NAME. Values: 242.04, 0.00, 1.13, [DL+LL]; 119.66, 0, 2.52, [DL+EQX]

4. 抗風索張力檢核

參見附錄三 SAP2000 分析結果，抗風索張力由 DL+WL 控制，最大拉力=0.51T，選用 10Φ 鋼絲繩索：切斷荷重為 6.57T

5. 垂吊索張力檢核

參見附錄三 SAP2000 分析結果，垂吊索張力由 DL+LL 控制，最大拉力=3.85T，選用 6x19D=16Φ 鋼絲繩索：切斷荷重為 13.1T

6. 抗風索張力檢核

參見附錄四 SAP2000 分析結果，抗風索張力由 DL+WL 控制，抗風索最大拉力為 7.28T，選用採用 F70T，降伏荷重=61.5T，平時允張力=33.3T

樓塔連力檢核

本案鋼塔鋼柱(H=12m)採用口 12\*400\*400mm 結構方管，橫梁採用口 9\*300\*300mm 結構方管，材質為 STK400...

7. P1 樓塔柱及基礎檢核

7.1 樓塔柱 B=440CM,D=140CM

9

參見附錄六柱底反力 SAP2000 分析結果

F'c =280 kg/cm² Fy=4200 kg/cm² 保護層 7.5 cm

Table with 4 columns: Pu, Mux, Muy, NAME. Values: 242.04, 0.00, 1.13, [DL+LL]; 119.66, 0, 2.52, [DL+EQX]

進行配筋設計

主筋設計結果：

需求鋼筋量：50.56cm² 鋼筋百分比：0.082% 1. 依規範配筋設計規範 1% < ρ < 6% 故取 ρ=0.01, Ass=616 cm²

剪力設計結果：

考慮極限地震力作用下，產生之柱底彎矩 a. 未折減地震力造成之柱底彎矩：(Z\*1/C/Kh)\*PQx=0.23x1.2x2.50x2x3.63=12.52 t-m (Control)

依公路橋梁設計規範

非開孔處之剪力配筋率：S = Av/0.3 x hc x(Fc' / Fy) x (Ag/Ag-1) 開孔處之剪力配筋率：S = Av/0.09hc x(Fc' / Fy) x (0.5+1.25 x P/Fc' / Ag)

7.2 橋塔基礎板及基礎

基礎板：B=440CM,W=340CM,d=100cm

10

澳麗土重 1.5\*1.5\*1.5\*2.4=8.1T，安全係數=8.1/7.28=1.11

9. 左岸主索基礎檢核

1.左岸主索基礎：參見附錄一 SAP2000 分析結果，主索張力由 DL+LL 控制 選取土體重=(3.3\*2\*1.25\*2+2.4\*4\*1.1+1.5\*5\*5.1)\*2.4=225.86T

2.右岸主索基礎配筋：B=115CM,D=190CM Mu=(36.11\*2\*5.7)=411.65 T-M f'c =280Kg/cm2 fy=4200kg/cm2

3.P2 基礎板：B=500CM,W=490CM,H=150CM Mu=(36.11\*2\*7.2=520 T-M f'c =280Kg/cm2 fy=4200kg/cm2

8. 右岸主索背拉錨定座及抗風索錨定座檢核

1.右岸主索背拉錨定座：參見附錄一 SAP2000 分析結果，由 DL+LL 控制 選取土體重=(3\*2.5\*4+1.5\*4.7\*5)\*2.4=156.6T

2.主索錨定座配筋：B=390CM,D=240CM Mu=(78.7\*3)=236.1 T-M f'c =280Kg/cm2 fy=4200kg/cm2

3. 抗風索錨定座：參見附錄四 SAP2000 分析結果，由 DL+WL 控制 拉力最大為 7.28T

11

五、參考文獻

- 1. 王仲宇，陳志賢，李承儒，「吊橋的監測與診斷」，第九屆公共工程非破壞檢測研討會論文集，台北（2015）。
2. 中國土木工程學會學刊，「世界最長的人行吊橋在捷克通橋」，2022。

12