



國內大跨徑預力梁橋面臨之問題 與因應對策探討

黃炳勳／台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部 資深協理

吳弘明／台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部 副理

劉 珊／台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部 副理

蘇彥彰／台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部 正工程師

前言

2018年8月14日義大利熱那亞跨越 Polcevera 河及 Sampierdarena 工業區之莫蘭迪橋 (Morandi Bridge) 於當地時間 11:36 一場暴雨中, P9 橋塔與相鄰之橋跨崩塌, 造成車輛墜落及人員死傷之慘劇, 橋梁崩塌前後之照片如圖 1。莫蘭迪橋係於 1967 年完工通車, 發生事故橋跨之結構系統屬於早期預力鋼腱外置之斜拉預力混凝土橋, 橋齡已達 50 年, 初步研判係橋塔處支撐橋面之預力斜索突然斷裂造成橋梁崩塌, 至於引致斜索斷裂之原因, 可能由於橋梁老舊、鋼腱或鋼筋腐蝕, 另外交通量之成長達設計時之四倍, 造成橋體負荷加重及材料之疲勞, 橋上進行維修補強所增加之重型混凝土護欄和

風暴等, 都有可能是導致崩塌之相關因素, 此事件喚起世人對於老舊橋梁結構安全之重視。

多年來負責管養這座橋梁的公司 (the Autostrade Company) 雖持續檢查、監控和維護這座橋梁, 且已在 2018 年 6 月發包, 預計在 5 年內完成橋塔 P9 及 P10 之斜索補強, 但仍未能避免此災害。此事件更使歐洲各國如德國、法國及義大利等相關研究機構呼籲對老舊橋梁有腐蝕及結構劣化者, 應特別予以維修補強或改建, 更促使義大利政府召集 200 多位工程師對該國高速公路老舊橋梁是否需改建進行檢討。另據資料顯示, 在利比亞同屬該結構系統之 Wadi el Kuf 橋 (如圖 2), 於 2017 年 10 月在橋上發現有潛在之斷裂危險後, 考量安全因素已封閉禁止通行。



莫蘭迪橋崩塌前 (Photo: From Wikipedia)



莫蘭迪橋崩塌後 (Photo: Stringer/Reuters)

圖 1 義大利 Morandi Bridge 崩塌前後之照片



圖片來源：www.dobooku.com

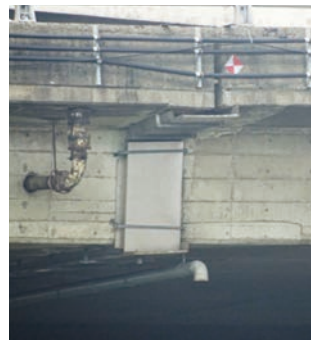
圖 2 利比亞 Wadi el Kuf Bridge

雖然國內並無與莫蘭迪橋相同結構系統之橋梁，對於大跨徑預力混凝土橋，除早期國道 1 號圓山橋（如圖 3）、台北市新生高架松江橋（如圖 4）及民權大橋（如圖 5）等以懸臂施工之中間鉸接處因混凝土乾縮、潛變及預力損失而造成橋面下垂問題外，國內許多已完工通車中之大跨徑預力混凝土橋，亦有因設計、施工或腐蝕問題等因素，而造成橋面下垂問題。雖然目前橋梁管養單位

均已注意並監測或補強，惟問題似乎持續存在，無法完全解決結構安全之隱憂。另對於新穎之脊背橋橋型，其外置斜拉鋼索長期之維護與防蝕問題，亦應特別關注。現今之橋梁工程師除應關注橋梁材料老劣化對橋梁結構完整性的影響外，亦不應忽視環境和極端天氣條件的潛在影響。本文蒐集國內外大跨徑之預力混凝土損傷及補強案例，探討相關因應對策，供國內工程界參考。



中山高圓山橋中間鉸接端下垂現況



鉸接端補強現況



橋墩補強現況

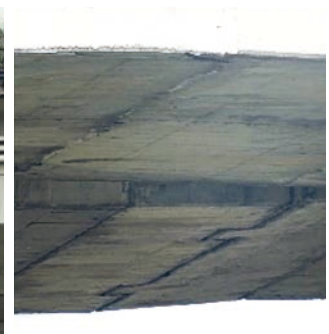
圖 3 台北市中山高圓山橋現況照片



新生高架 — 松江橋中間鉸接端下垂現況



西側鉸接端分離現況



東側鉸接端現況

圖 4 台北市新生高架 — 松江橋現況照片



民權大橋中間鉸接端下垂現況



中間鉸接端分離與補強現況



橋面路面不平整現況

圖 5 台北市民權大橋現況照片

國內大跨徑預力梁橋發展情況

國內大跨徑之預力混凝土橋早期並不多見，1968 年完成第一座以懸臂工法施工、跨徑 120 m 之長虹橋 [1]，其後尚有跨徑達 150 m、懸臂工法施工之國道 1 號圓山橋，跨徑 134 m 預力混凝土斜張構造之光復橋，以及台北市新生高架松江橋、民權大橋與建國高架跨仁愛路、信義路段之預鑄節塊等大跨徑預力混凝土橋。二高建設時期大規模引進歐美先進國家之施工法，如預鑄節塊、懸臂工法等，多跨連續大跨徑預力

混凝土橋之興建在當時達到高峰，國道 3 號關西大橋之懸臂預力橋為台灣第一座中央無鉸結之懸臂預力混凝土橋，其最大跨徑為 120 m。而最近陸續完成之國道 1 號五楊高架、省道台 9 南迴、蘇花改及各高快速公路，主跨徑 90 ~ 150 m 間者比比皆是，如圖 6。另具有景觀意象之預力拱橋（如圖 7）或採外置預力之脊背橋（如圖 8），主跨徑亦達 150 m 以上，目前全台完成者已達 10 餘座，興建中之金門大橋採五塔六跨連續設計，主跨徑更達 200 m。



台 9 線蘇花公路南澳和平段工程



台 9 線南迴公路安朔至草埔段 C1 橋梁標

圖 6 採懸臂工法之連續多跨變斷面預力混凝土橋



台 61 線新豐溪橋（跨徑 100 + 180 + 100 m）



圖 5 冬山河橋（跨徑 94 + 187 + 94 m）

圖 7 具景觀意象之預力拱橋



台9線新豐平橋（跨徑 84 + 2@140 + 84 m）



台9線蘇花改南澳北溪橋（跨徑 95 + 160 + 105 m）

圖 8 採外置預力之脊背橋

國內外大跨徑預力梁橋面臨之問題

台灣地區許多橋梁之橋齡已高，橋梁受到嚴苛的環境條件影響，例如洪飈、高溫多雨、車輛超載等因素，使得橋梁可能於使用年限中受到損害或劣化，進而導致橋梁承載力不足、服務功能喪失以及影響使用安全。

一般鋼筋混凝土橋梁劣化之原因，可歸類為自然現象、人為因素及環境因素三方面。自然現象一般係指材料本身的特性與物理作用因素，包括混凝土乾縮、潛變、預力損失、溫度效應等，以及天然災害如地震、颱風、洪水及土石流等因素，導致橋梁的損傷及劣化現象。人為因素係指橋梁結構於設計施工階段，因設計不當、施工不良或使用不當的材料等因素，造成橋梁構件具有先天不良的缺陷。設計不當常使結構承受過高的壓力、張力、剪力、扭力等，導致混凝土開裂或剝落；材料設計時，選擇之水泥類型不當、水泥用量不足、水灰比過高、混凝土強度或鋼筋降伏強度不當、骨材級配不良等情形，均為混凝土結構可能發生劣化因素；或者因用路人不當使用等外在因素如超載、撞擊及火害等，使橋梁構件產生非預期的損害。環境因素係指所處環境周圍之有害物質侵蝕，如空氣中鹽分、氯化物、硫化物及一些侵蝕性水質，皆會經由混凝土孔隙或前述因素造成損傷之部位滲入，引起鋼筋混凝土材料發生一系列的化學與物理變化，造成鋼筋混凝土品質開始劣化，出現表面龜裂、剝落、鋼筋腐蝕、體積膨脹、開裂等損傷現象，嚴重時將使鋼筋混凝土構材強度降低，而導致破壞 [2]。

預力混凝土橋及鋼筋混凝土橋為台灣最普遍的橋梁類型，對材料性質而言，兩者均採用鋼筋混凝土材料，對結構性質而言，兩者的區別則是主結構構材是

否施加預力。因此預力混凝土橋對於預力系統狀況瞭解及掌握是非常重要的，若預力損失或其材料劣化，亦將危及橋梁結構安全。預力系統的劣化成因，可區分成材料與結構二方面。

材料方面，一般混凝土構件可能受混凝土乾縮、潛變或其他環境不良化學反應造成劣化。此外，預力鋼筋鋼材之腐蝕是預力系統與其他鋼筋混凝土橋最大不同的特徵。導致鋼筋腐蝕常見的因素有下列幾點，如端錨無密封墊防止水滲入，混凝土乾縮、潛變生成裂縫，套管品質不良產生滲水等因素，而最常見因素為套管中水泥砂漿的填充不確實或混凝土蜂窩之生成，此因素為最重要，因為鋼筋未受到保護，使得鋼筋與滲入水產生作用，導致鋼材腐蝕狀況生成，進而使鋼筋受損及預力損失。如美國 Lowe's Motor Speedway Pedestrian Bridge 橋鋼筋腐蝕造成斷裂（2000年，如圖9），事後發現11根鋼筋皆腐蝕。一般檢測方式為利用目視檢查混凝土裂縫狀況以及有無滲水，另有透過超音波方式檢測套管中水泥砂漿及鋼筋腐蝕斷裂狀況，抑或以軟管式攝影機檢測套管內部。

結構方面，如預力混凝土之潛變與乾縮及鋼筋鬆弛或疲乏，將導致鋼筋內預力減少，造成預力梁撓度增加及降低承載能力，對於使用安全性有一定影響。此外，溫度梯度、乾縮及潛變應變力重分配估算過低、鋼筋套管間摩擦力估算過低、套管漂浮等亦會導致預力與預期不同，為導致撓曲裂縫的主因，使得構件劣化。然而目前大部分預力橋梁檢測大多專注外部目視檢測，或針對鋼筋腐蝕問題等進行檢測，而對於預力損失之估算，國內規範均建議依歐美日規範規定之潛變乾縮公式進行預力長期損失的計算，這方面對於國內既有橋梁尤其是長跨徑橋梁之預力現況的掌握未必足夠，如此也可能對於預力橋梁於設計年限50年甚至100年之結構安全性



圖 9 美國 Lowe's Bridge 鋼腱腐蝕造成斷裂

的不確定。而其他較為深入詳細的預力檢測技術也常為破壞性檢測方法，如應力釋放法（切槽法）、十字弓法（crossbow method），或透過動態方式進行評估等，然如破壞性試驗方法較難於實際橋梁上應用，可執行性具有一定困難度，因此既有橋梁預力現況鑑定之準確度不易掌握且繁複 [3]。

國內外有關長跨徑預力橋因混凝土乾縮及潛變、預力損失、預力鋼腱銹蝕等因素所面臨之問題，可大致分為：A、具有中央鉸接橋梁之異常撓度增加，及 B、懸索系統橋梁結構安全風險之二大類案例，說明如下：

A、具有中央鉸接橋梁之異常撓度增加

國道 1 號圓山橋

1977 年完工迄今已 41 年，主跨長 150 m，為懸臂施工之預力混凝土箱型梁橋，主橋跨中間採鉸接方式設計。由於具有中央鉸接之橋梁於懸臂施工階段與結構體系完成後之靜載重彎矩相近，可以簡易計算達成大跨徑橋梁之設計，因此於計算機不發達的年代，建造了不少此類型之橋梁。本橋通車 15 年後，主橋跨中間鉸接處有明顯下垂現象（如圖 10），最大處達到 63 公分，遠大於原設計估計之 21 公分，研判係因混凝土



圖 10 國道 1 號圓山橋主跨中間鉸接處下垂現象
（陳振川教授簡報圖資）

之乾縮與潛變大於預期，加上鋼腱鬆弛等問題，導致橋梁於梁跨中間鉸接點處撓度變位大於預估值，影響行車舒適度甚至可能影響使用安全。

台北市新生高架松江大橋

1979 年完工迄今已 39 年，主跨亦為懸臂施工預力混凝土箱型梁，跨河段主跨中間鉸接處亦有明顯下垂問題（如圖 11），影響行車舒適度，2008 年至 2009 年間曾進行新生高架橋改善工程。



圖 11 台北市新生高架松江大橋主跨中間鉸接處下垂現象

台北市民權大橋

1982 年完工迄今已 35 年，跨河段主橋跨 95 m，為懸臂施工預力混凝土箱型梁，主跨中間鉸接處有明顯下垂達 30 公分（如圖 12），影響行車舒適度。



圖 12 台北市民權大橋跨河段主跨中間鉸接處下垂現象

國道 3 號烏溪一號河川橋

2003 年完工，為懸臂施工之長跨徑預力混凝土箱型梁橋，完工通車後橋單元 PN17 ~ PN20（跨徑配置 $71.5 + 90 + 90 + 71.5 = 323$ m）等部分橋面陸續產生變形下垂現象，於伸縮縫邊跨箱梁沉陷量達 20 餘公分（如圖 13），並於伸縮縫前後路面凹陷導致伸縮縫處相

對凸出，影響行車舒適。評估主要因為施工幾何控制欠佳（預拱量低估）及混凝土長期乾縮潛變效應所造成，2009 年至 2012 年間，進行箱型梁內增設外置預

力補強、AC 平順加鋪等，並於 2013 年進行北上線橋單元減重剷除，以減少自重造成之下陷，近期監測觀察其變位已逐漸趨於穩定。

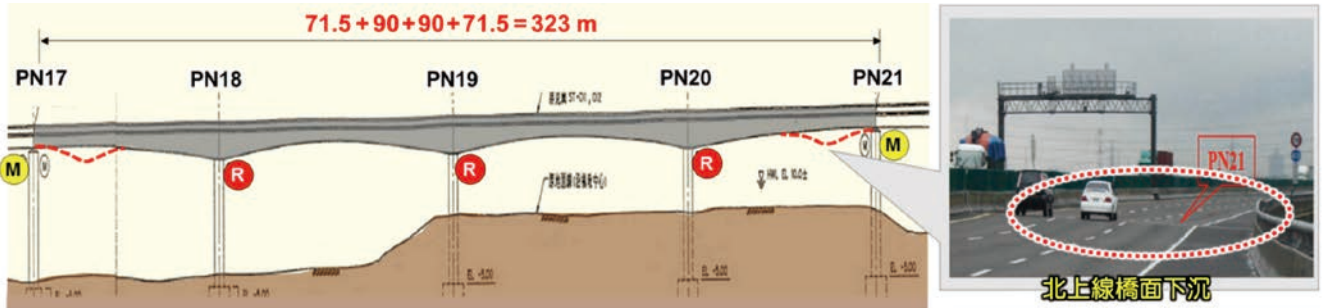


圖 13 國 3 烏溪一號河川橋邊跨橋面下沉

Koror-Babeldaob Bridge

帛琉的 Koror-Babeldaob Bridge 橋為懸臂施工預力混凝土箱型梁橋，主跨長 240.8 m，完工通車 18 年後，

主跨中間鉸接處變位下垂達 1.61 m，其預力鋼腱平均預力損失達 50%，於 1996 年的預力補強工程完工後 3 個月橋主跨崩塌（如圖 14）。

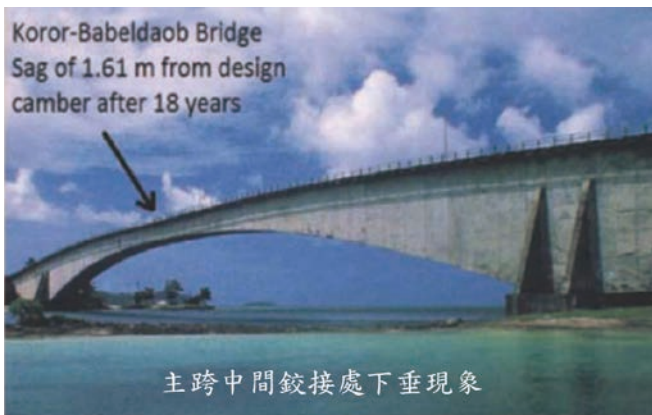


圖 14 帛琉 Koror-Babeldaob Bridge (Bažant et al. 2011)

日本浜名大橋

浜名大橋位於日本靜岡縣，於 1976 年完工，全長 631.8 m，為中央跨設有鉸接構造之五跨連續預力箱型梁橋，中央最大跨徑 240 m，為日本此類型橋梁規模最

大者。於完工後 35 年，中央鉸接位置相對於閉合時之位置，設計下沉量為 60 公分，閉合後約 12 年即超過設計下沉量，於竣工後 35 年之下沉量為 80 公分，下沉發展較設計值多了 20 公分左右。

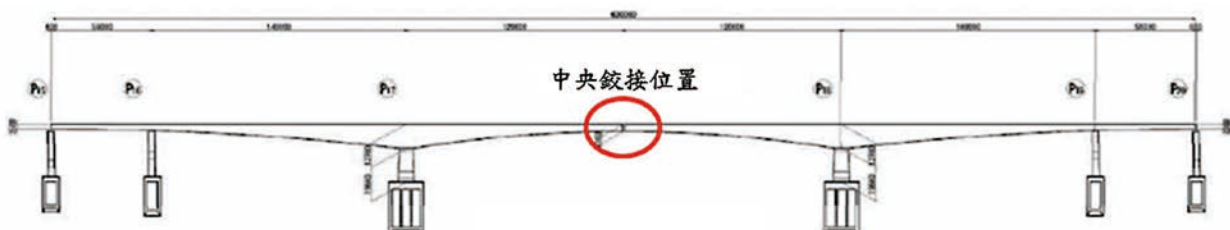


圖 15 日本浜名大橋立面圖

B、懸索系統橋梁結構安全風險

日本豐里大橋

本橋位於日本大阪府，1970 年完工，為三跨徑連續鋼板箱梁斜張橋，單面雙層之懸索構造，本橋雖非預力梁橋，但可以本案例來說明懸索系統贅餘度與橋梁結構系統安全之關連性。本橋於 2013 年詳細調查

中確認 C6 與 C8 懸索有銹蝕現象 [4]。由於本橋為單面懸索構造，單側懸索僅有二根，懸索根數少，靜不定度低，如有一根懸索銹蝕而斷面不足甚或斷裂，將因橋梁系統改變與力量轉移而造成其餘懸索承受過大載重而二次破壞，因此懸索銹蝕狀況之檢查應為橋檢之重點項目。

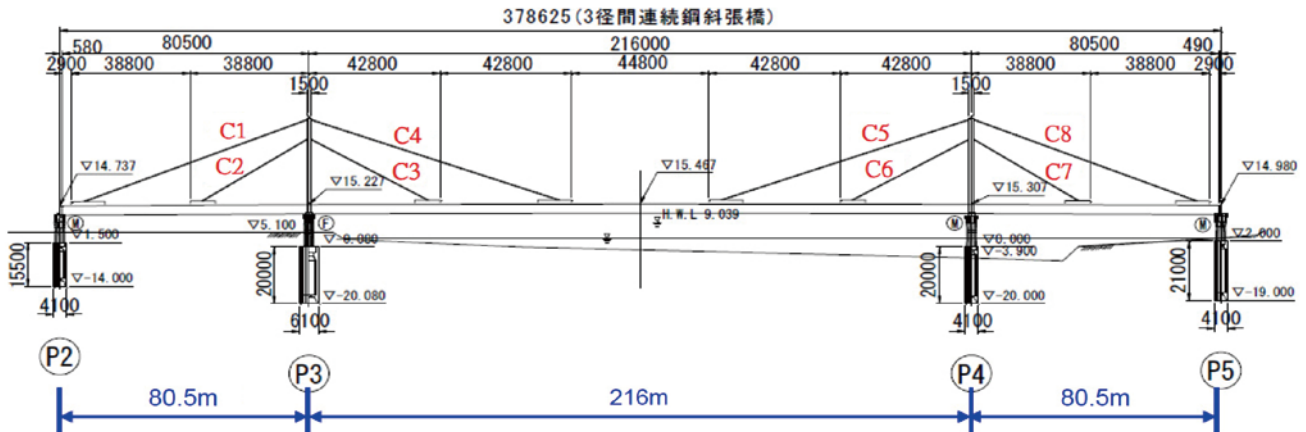


圖 16 日本豐里大橋立面圖

日本雪沢大橋

雪沢大橋位於日本秋田縣大館市雪沢地區，為最大跨徑 71 m、全長 177.1 m 之三跨連續脊背橋（單座脊背橋 + 側跨之 PC 箱型梁橋）；雪沢大橋之脊背橋為雙平行索面構造，共有 8 根 @2 面 = 16 根懸索，於

2001 年完工。2011 年發現雪沢大橋上游側索面由下起算第五根懸索斷裂，為了確保行車安全，於當日立即封閉交通。其後進行了斷裂原因調查、殘餘懸索健全性調查與懸索更換，於 2012 年 9 月恢復通車 [5]。

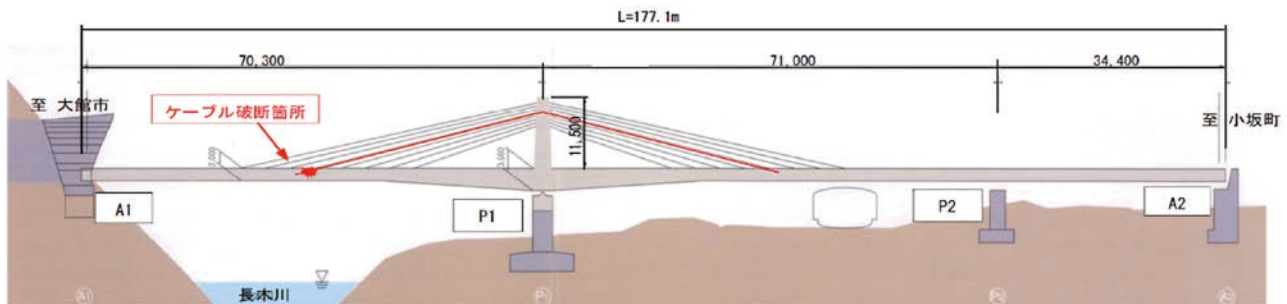


圖 17 日本雪沢大橋立面圖

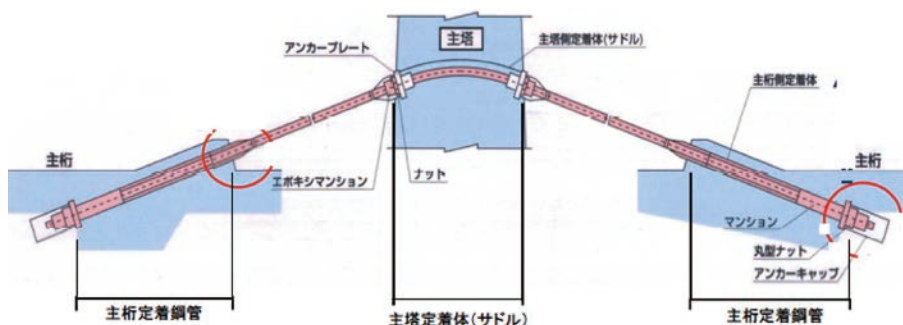


圖 18 雪沢大橋懸索錨碇構造示意圖

經過現場調查與分解調查後，發現未被覆之防蝕段鋼絞線嚴重銹蝕、錨碇鋼管頂部滯水、由斷裂鋼絞線可以檢測出含有氯離子成分。由電子顯微鏡觀察鋼絞線破裂斷面，分別有 2 種應力銹蝕破裂斷面及拉伸破裂斷面，詳見圖 19。至於進入錨碇鋼管的水，透過何種機制與 PC 鋼絞線接觸，經過詳細調查後，仍然無法解明。

破面の種類	凡例	形状	調査
破面の種類	○		60
	●		68
	△		5
合計			133

圖 19 雪沢大橋鋼絞線破裂斷面種類

因為水分有進入錨碇鋼管內之可能性，故有必要檢討殘餘懸索之健全性。雪沢大橋對於殘餘懸索健全性調查，直接採用抽取懸索、移除防蝕段鋼絞線外層被覆與內部灌注固化之防蝕材後，以直接目視方式檢查 PC 鋼絞線之銹蝕程度；觀察結果發現 PC 鋼絞線表面有點狀銹斑，且判斷銹斑為較近時期形成，無法排除為移除固化防蝕材時所採用水刀工法之水分之影響。由上述詳細檢查可發現，內部灌注之防蝕材可提供防蝕保護，相對地在維護管理上對於 PC 線材銹蝕狀況之檢查亦會造成妨礙。

維修補強對策案例

綜觀國內外大跨徑預力橋所面臨之問題已如前述，至於其因應對策，國內似鮮有案例。為利國內大跨徑預力橋梁所面臨類似問題及未來補修補強之參考，茲蒐集國外相關案例，綜整初步探討對策如下：

增設構件工法

此工法主要是針對跨徑中間具有鉸接之大跨徑橋梁，在既有橋梁外，另增建具補強功能之結構體，提供額外支撐力，以改善原橋梁超乎預期之橋面下陷，防止橋梁功能繼續低下及橋體構件之劣化。其主要方式如下：

1. 增設橋墩

直接在鉸接處橋下新建橋墩，以防止橋面繼續下垂，恢復原橋面之交通服務功能，可分散並緩解部分橋梁結構之應力。但此法往往必須於河道或橋跨間施築，可行性受限於橋址施工環境特性，橋梁景觀性亦受改變，其結構示意如圖 20。

2. 增設輔助拱結構

在鉸接處橋跨下，相鄰兩橋墩間新建拱狀結構，以支撐下垂之橋面，恢復原橋面之交通服務功能，並分散及緩解部分橋梁結構之應力。由於此法必須於橋跨下新建橋拱，若跨度太大或橋下施工環境不佳，則其可行性將受限。其結構示意如圖 21，國外類似案例，如日本的矢井原橋 [6]。

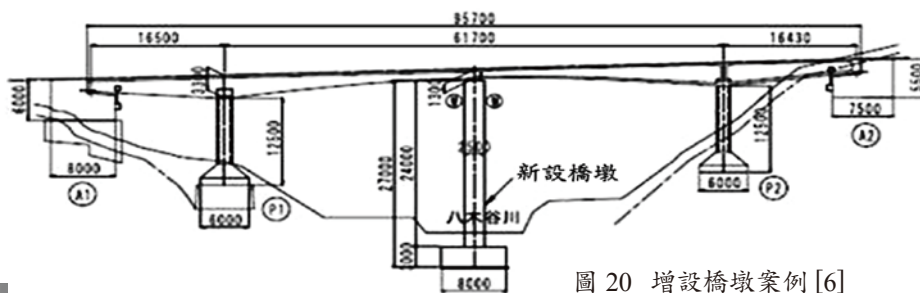


圖 20 增設橋墩案例 [6]



日本矢井原橋

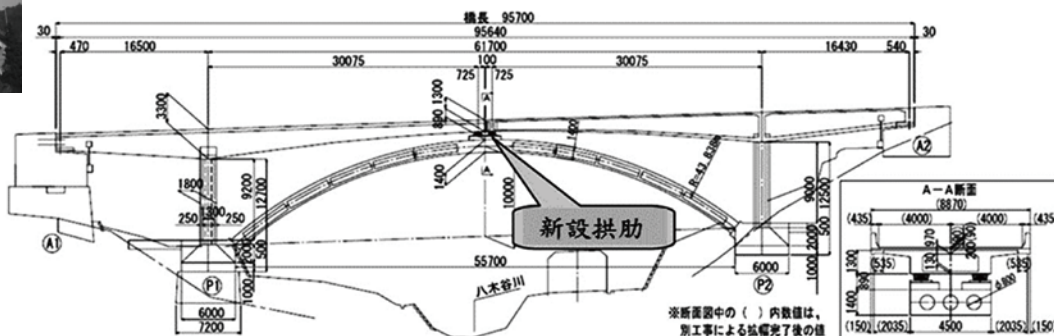


圖 21 增設輔助拱結構案例 (日本矢井原橋) [6]

3. 增設橋塔與斜張系統

此工法主要是在鉸接橋跨兩相鄰橋墩處，新建橋塔結構，並輔以斜張鋼索系統，以支撐下垂之橋面，恢復原橋交通功能，並分散及緩解部分橋梁結構之應力。由於此法主要係於橋墩側及橋面上施工，施工性較佳，惟其結構性變異較大，鋼索施拉造成橋梁結構應力的重新分配尤應深入檢核，其結構示意如圖 22，國外類似案例，如挪威的 Puttesund 橋 [7]。

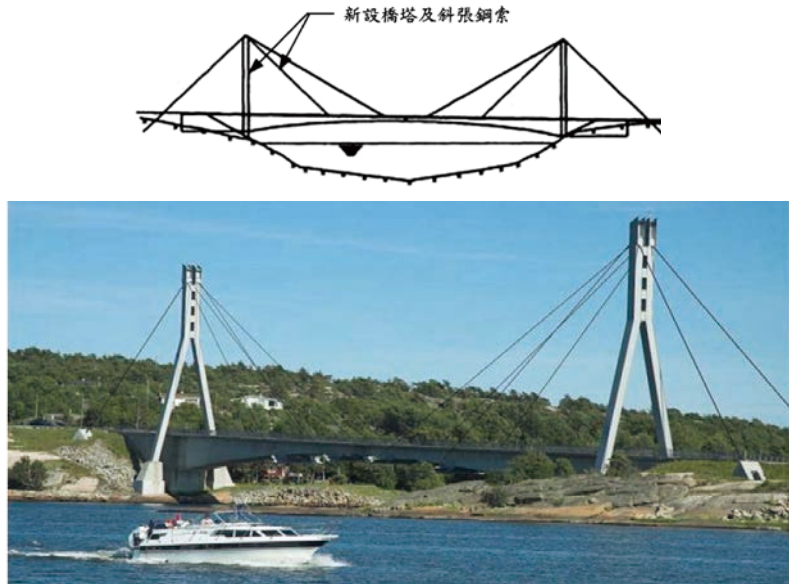


圖 22 增設橋塔與斜張系統案例 (挪威 Puttesund 橋) [7]

外置預力工法

此工法主要是於橋跨中以外置預力增加抗彎矩能力，以達到既有橋梁之補強功能，進而防止橋梁功能繼續低下及橋體構件之劣化。其主要方式如下：

1. 箱梁內增設外置預力

於 PC 箱型梁內增設必要之隔梁、轉向塊、錨碇塊等構造，並配置適當預力鋼腱及施拉，及考量必要的連續化處施工，以達改善及補強效果。由於此工法施築主要都在箱梁內進行，故完成後橋梁之外觀幾乎不受影響，其結構示意如圖 23，國外類似案例，如日本的浜名大橋 [8]。

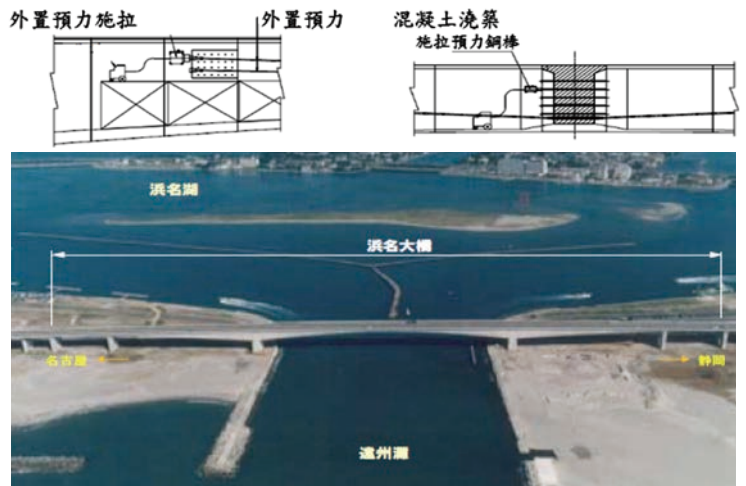


圖 23 增設外置預力補強工法案例 (日本浜名大橋) [8]

2. 複合型外置預力

於 PC 箱型梁內外增設必要之隔梁、轉向塊、錨碇塊等構造，並配合鋼構架及適當預力鋼腱施拉，以達到對既有橋梁提供必要之補強效果。由於此工法鋼構架係設置於箱梁外，故完成後橋梁之橋下淨高及外觀等些許受影響，其結構示意如圖 24，國外類似案例，如日本的喜連瓜破高架橋 [9]。

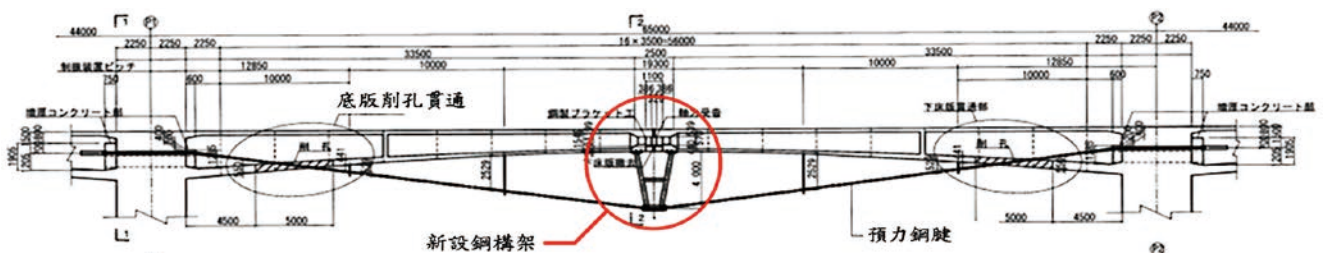


圖 24 增設複合型外置預力補強工法案例 (日本喜連瓜破高架橋) [9]

變更結構系統工法

此工法係將既有橋梁鉸接構造進行實質結構性改變，改造為連續性的橋梁結構，以達到橋梁結構的連續化及結構靜不定度的增加，對既有橋梁提供良好的

補強效果。由於此工法必須對原橋梁結構體進行必要之切梁，因此對於既有橋梁之鋼腱切斷與接續必須予以審慎評估，以免危及施工期間橋梁之安全性，其施工示意如圖 25，國外類似案例，如日本的鈴田橋 [10]。

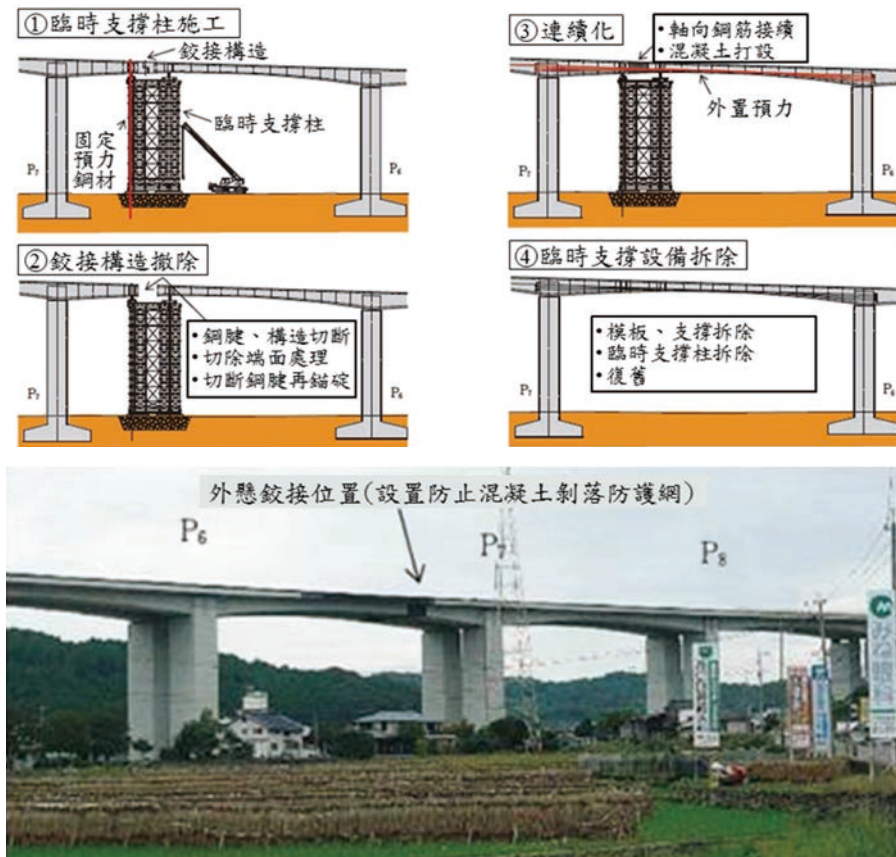


圖 25 構造改變工法 (日本鈴田橋)[10]

提升懸索檢測維修對策

對於懸索健全性之檢測，如採用強制振動法之固有週期測定或全磁束法之非破壞檢測銹蝕方式，若斷面缺損沒有到相當程度，於測定上較為困難，無法早期發現及確認鋼腱是否銹蝕；然若如同雪沢大橋對於殘餘懸索健全性調查，如採用直接目視方式檢查 PC 鋼絞線之銹蝕程度，則須移除鋼絞線外層被覆與內部灌注固化之防蝕材後方能檢測，對於健全橋梁之定期檢測作業不一定適用。因此於設計階段，宜對於懸索系統之細部構造多加探討，研擬容易檢測懸索是否銹蝕之結構細部。

例如雪沢大橋根據懸索斷裂之詳細調查結果，於懸索復舊時採取主要對策為：(1) 錨碇鋼管頂部防水對策，採用三重防水構造以完全阻絕水分經由錨碇鋼管

頂部進入錨碇鋼管內部；(2) 錨碇鋼管錨頭防銹處理，採用鋅鋁溶射防銹處理，以取代原有之充填防蝕材之防銹方式，避免對於鋼腱養護檢查時造成妨礙；(3) 錨碇鋼管內部排水對策，為避免錨碇鋼管內滯水，造成鋼腱與水分接觸，於錨頭墊片設置排水開槽孔。

同時在未來之維護管理方面，於現有維護管理手冊中追加雪沢大橋特殊構造之檢查項目，於每年 1 次的檢查時，以接近目視方式檢查錨碇鋼管頂部之防水構造與箱梁內錨頭之排水孔；同時於 5 年 1 次之定期檢查時，以高空作業車接近目視方式檢查主塔與懸索，並以強制振動法量測懸索之固有周期，並與懸索更換完成時之固有周期初始值進行比較，以掌握確認懸索之經年變化。

後續精進作為

設計與施工面之檢討

設計面

由於混凝土材料係由水泥漿體及粗細骨材構成，在混凝土硬化之過程會產生乾燥收縮變形，且於承受外力時會產生潛變，此種變形隨時間逐漸發生，且在長跨預力混凝土橋特別明顯。橋梁變位逐漸增加除影響行車舒適性外，亦可能造成額外預力損失及內應力重新分配，影響橋梁壽命甚至減低結構安全性。Z. P. Bazant [11] 收集相當多長跨預力橋梁之長期變形資料，證實橋梁在使用數十年後仍持續產生變形，圖 26 為依據不同規範或預測模型計算 Koror-Babeldaob 橋之變位發展，可明顯看出一般規範預估之變位值遠小於實際之變位量 [12]。另依 Z. P. Bazant 之研究 [13]，潛變之發展不會朝一終值趨近而會持續發展，如圖 27 所示。

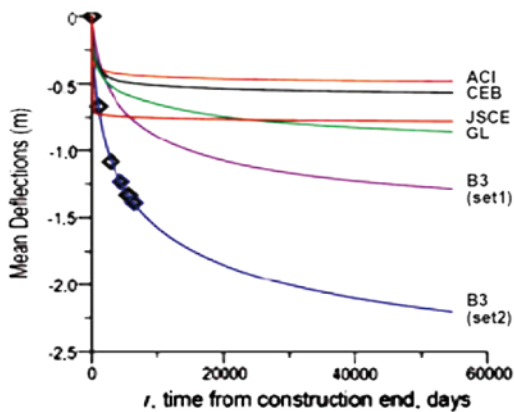


圖 26 不同規範或預測模型計算 Koror-Babeldaob 橋之變位發展

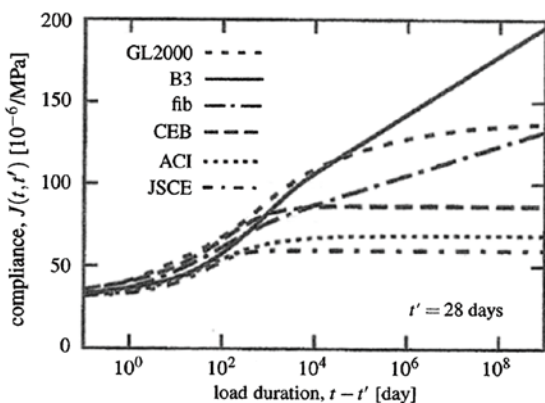


圖 27 不同規範或預測模型計算潛變順應模數 (Creep compliance)

國內橋梁設計規範僅規定設計時應考量混凝土潛變及收縮之影響，但對於如何計算潛變及收縮之變化並無相關公式，故設計時僅能參照國外規範如美國之 ACI 規範或歐洲之 CEB-FIP 規範。而國內之混凝土材料與國外差異極大，台灣粗骨材之彈性模數偏低 [14]，為達到混凝土之需求強度，使用漿體量偏高，故收縮及潛變量較大，引用國外規範無法確實反映國內混凝土材料之性質。另外國內混凝土之水泥採用卜作嵐材料替代之比例高，與國外多採一般混凝土不同，規範是否能夠應用值得探討。

為準確預估長跨預力橋梁之變形及對預力損失之影響，國內應就混凝土潛變及收縮性質進行研究，找出在地合理的預測模式，納入結構分析及施工預拱值計算，才能掌握橋梁的長期行為，避免影響使用性甚至減低橋梁整體承載能力。

施工面

大跨徑（主跨徑 > 60 m）變斷面預力混凝土橋、PC 拱橋及脊背橋，一般都會採用節塊（場鑄或預鑄）利用工作車來逐節施作，故在施工之品質控制是非常重要的，尤其是線形精度與拉預力量之控制常是影響橋梁完工品質之關鍵。在國內施工常見的問題是對拱度之控制精度不良，造成閉合節塊之高差與縱面高程無法符合設計高程之問題，此問題除了造成結構體外觀線形不佳外（如圖 28），導致施工或養護單位為讓節塊順利閉合和路面高程平順，而常以增加混凝土斷面厚度或加鋪 AC 厚度來達到設計高程要求或路面之平整度，但以此方式將會增加橋體結構之承載負荷，如未檢核原設計之容許承載能力將導致有結構損傷之疑慮。原橋面因施工不良增加額外載重再加上預力混凝土之乾縮潛變等因素，將導致橋面下垂變形更加嚴重，橋梁養護單位又常因路面下垂不平整而再加鋪 AC 以求用路人行車之舒適性，如此惡性循環長時間以後，橋體因負荷加重再加上混凝土之乾縮潛變及預力鋼腱鬆弛所造成之預力損失，而使橋體受損產生裂縫（如圖 29），進而影響橋體結構安全及使用年限。

以懸臂工法施工最影響其施工品質者為 (1) 施工時節塊線形之控制 (2) 施拉預力之控制，其主要之控制因素概述如下：



節塊施工線形控制不佳

曲線線形控制不佳，外型呈現扭曲

圖 28 節塊懸臂施工線形控制不佳案例



大梁節塊腹板剪力及底板撓曲裂縫

節塊開裂

圖 29 橋體之結構裂縫

(1) 施工時節塊線形之控制：

包括水平（平面）線形與縱面（拱度）線形之精度控制，線形控制主要在於確保橋體完成後能符合設計要求，同時結構體內應力能維持在容許範圍內，線形之變化與設計基本參數、施工條件與施工機具等息息相關。

水平線形之控制必須考慮相鄰兩節塊間相對位移，包括有施加預力之結構彈性變形、混凝土之乾縮變形、結構體因載重造成之潛變變形、溫度變化引起之變形等，一般場鑄節塊於每節塊施作時須以分析之預測量來調整工作車及模板之線形，採預鑄節塊施作者則須考量採短線或長線鑄造之不同控制要點。

拱度控制由於橋梁在施工過程中，橋體會因自重、預力、乾縮潛變、溫度、施工機具及施工方法等因素產生撓曲變形，如此將使橋體施工線形與設計線形產生一偏差量，此一垂直變化量即為拱度，其值之大小亦與材

料勁度有關，為使橋梁在完工後結構線形能符合設計原意，因此節塊在混凝土澆置作業進行前，模板高程需額外預加一撓曲變形量，此值即為預拱值。由於拱度變化受自重、預力、乾縮潛變、施工誤差與各項外載重所影響，為確保節塊拱度誤差量能維持在管理範圍內，拱度控制作業規畫須包含前置階段結構分析、監測點配置、施工期間高程資料量測、判讀與回饋等，而結構分析模式應依工法之特性，建立分析流程以提供拱度比對之相關數據，監測點位則參考施工階段預測橋體節塊之變化曲線進行配置。橫向高程變化調整（超高）變化調整可依鑄造曲線所需之高程變化平均分配至各節塊，並藉由澆置完成之節塊高程座標而使新接合鑄造節塊相對高程改變，達成節塊變斜率之橫向傾斜度控制作業。進行節塊拱度控制作業時，基於節塊垂直線形係與橫向傾斜度相互影響，因此需綜合評量橫向傾斜量與垂直線形；而垂直線形計算值必須考慮跨徑設計高程及施工階段之預

拱值，故進行檢測控制作業時須包含上述各項計算值，並據以求得工作車上之模板或預鑄床軌道上各控制點位之對應高程。如有誤差時可調整工作車上之模板或用填隙墊片調整預鑄場上軌道高程。為求有效控制施工階段節塊位移變化，可利用幾何線形施工監控程式 GCP (Geometry Control Program) [15]，利用位移法配合結構系統勁度矩陣修正模式，綜合考量節塊之施工程序及混凝土結構隨時間變化特性因素等影響，透過程式模擬解算，即時修正各節塊接合施工之幾何誤差。

(2) 施拉預力之控制：

懸臂工法之預力施拉一般採平衡對稱施拉，每節塊施拉完預力，皆應量測各節塊之控制點高程並檢核與預測值比較其差異，再將差異值回饋至後續節塊之預拱高程作調整線形符合設計需求。現場施拉之預力量大小之控制，當以設計圖所需之有效預力為準，千斤頂應經過校對檢驗，施拉時以千斤頂之油壓表為準再輔以鋼腱伸長量作檢核，一般伸長量在 $\pm 5\%$ 左右，若油壓表已達需求值但伸長量異常，不應繼續超拉，而應暫停施拉並檢查套管內是否有漏漿或因穿線時鋼腱扭絞等而使伸長量發生問題。

橋梁之結構安全監測

近幾年來量測技術和電腦處理能力提升，橋梁結構在施工及完工階段可利用各種儀器量測結構位移沉陷、震動或鋼纜索力，營運中之橋梁也可藉由量測結構物的振動特性，更精確地掌握橋梁實際現況。

對於已有損傷之橋梁結構必須作即時有效之補強與監測，以莫蘭迪橋為例，雖然在事件發生之前作了檢測與試驗，許多專家學者亦提出警訊，負責維護管養之公司亦發包進行維修補強，但卻在 P9 及 P10 還未來得及補強前，即發生不預期之突然倒塌事件，造成重大用路人之死傷，所以對於已有損傷之橋梁結構且仍繼續營運者，雖已有在進行監測或維修補強作業，亦不可掉以輕心，應隨時監測其橋梁之狀況，應利用可即時監測系統 (realtime) 配合 WIFI 無線傳輸，隨時監視橋梁健康狀態，如有發現異常警訊時，必要時應立即封閉交通作進一步之特殊檢測與診斷評估橋梁之安全性，以確保用路人之行車安全，避免莫蘭迪橋事件之慘劇再次發生。

橋梁長期安全監測 西濱-房裡大安脊背橋

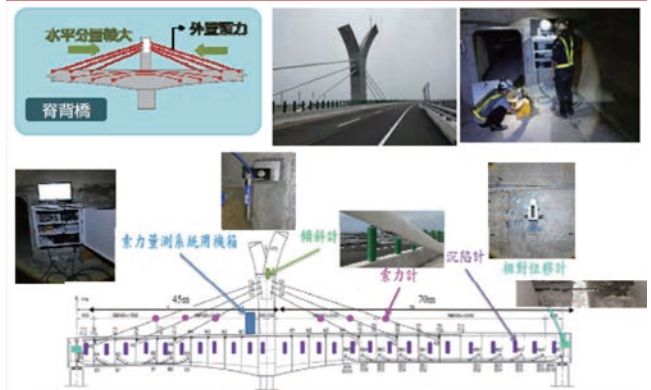


圖 30 橋梁監測案例 (宋裕祺教授簡報圖資)

結論與展望

莫蘭迪橋倒塌事件成因複雜，諸如斜索腐蝕、交通量負載過重、材料疲勞、不當維護補強等皆為探討倒塌因素之方向。由本事件反思國內大跨徑預力梁橋所面臨之問題與如何因應，可就設計與維管層面進行發想與檢討。

在設計層面上，莫蘭迪橋設計採用了當時最先進之技術，以最小量之下部結構支撐量體完成長跨徑上部結構之橋梁架設。然而以今日技術觀之，仍有材料、潛變、防蝕、結構系統贅餘度、超過載重等於橋梁設計規劃階段須檢討改善之面向。鑑古知今，對於今日吾人建設大跨徑預力橋梁時，在面對未來環境變遷與極端氣候之挑戰下，諸如使用材料與設計規範之差異性、預力混凝土潛變設計值與實際潛變發展之差異、嚴苛環境條件下之防蝕設計、超過設計規範載重之極端事件等等面向，仍須要戮力進行檢討改善與精進；同時，在今日防災意識提升之共識下，面對諸如超出設計地震力等極端事件風險之提高，結構系統之贅餘度將直接關係到道路橋梁系統之災害承受能力，設計所採用橋梁系統之強健性 (robustness) 與韌性 (resilience)，當為未來研究方向之重點。

在維管層面上，由莫蘭迪橋倒塌事件與日本雪沢大橋懸索斷裂案例可了解，即便對於懸索為結構系統重要構件之體認已無庸置疑，但仍因諸如鋼腱銹蝕情況檢測不易等因素下，無法早期發現而終至斷裂事件發生，甚至進而影響橋梁結構系統之安全，因此結構

細部設計與檢測技術之相互配合，當為未來努力研究之方向。同時由案例中現場維管人員對於橋梁系統之特性了解不夠，採用不當加載等維修工法造成潛變下沉加劇之情況，因此對於特殊橋梁檢測方式與規範，應為未來探討與落實之方向。

參考文獻

1. 賈駿祥，「台灣地區橋梁工程之發展」，臺灣公路工程，第三十卷第十二期，民國九十三年六月。
2. 財團法人中華顧問工程司，「混凝土橋梁常見劣化樣態探討」，財團法人中華顧問工程司編著，中華民國一〇六年二月。
3. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「受壓及預力構件軸力檢測技術研發與應用」，台灣世曦公司研發計畫成果報告書，中華民國一〇六年十二月。
4. 西道路研究會道路橋調查研究委員會，「斜張橋ケーブルの耐久性評価と今後の維持管理」，2018.01。
5. 神田隆仁、船木孝仁、高橋昌平、高野優、越前谷宏昭，「雪沢大橋ケーブル破断への対応と今後の維持管理について」，国土交通省・平成26年度東北地方整備局管内業務発表會。
6. 西口喜隆、小西純哉、高龍，「老朽化した有ヒンジラーメン橋補強工事の計画と施工（国道9號矢井原橋）」，建設の施工企画，2008.10。
7. Gordon Clark, "The development of prestressed concrete bridges", CBDG Conference 1st July 2010.
8. 加藤達也、辻英雄，「～平成の大改修～「浜名大橋」橋梁補強について」，平成23年度国土交通省国土技術研究會，2011.10。
9. プレストレスト・コンクリート建設業協 中国支部，「PC橋の補修・補強技術」，平成26年1月10日。
10. 尾堂良一、駒谷大三、熊谷裕司、安藤直文，「鈴田橋のゲルバーヒンジ部補修における設計・施工」，コンクリート工学，2013.08，Vol. 51 No. 8。
11. Z. P. Bazant, M. H. Hübner & Qiang Yu, "Excessive Creep Deflections: An Awakening, Data from numerous long-span prestressed segmental box girders show alarming trend", Concrete International, Aug. 2011.
12. Z. P. Bazant, Qiang Yu, Guang-Hua Li, G.J. Klein & V. Kristek, "Excessive Deflections of Record-Span Prestressed Box Girder: Lessons learned from the collapse of the Koror-Babeldaob Bridge in Palau", ACI Concrete International, Vol. 32, No. 6, Jun. 2010.
13. Z. P. Bazant & M. Jirasek, "Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures", 2018.
14. 陸景文、詹穎雯、陳振川，「台灣地區混凝土抗壓強度與彈性模數特性研究」，中國土木工程學刊第十四卷第三期，中華民國九十一年九月。
15. 莊輝雄、蔡同宏，「預鑄節塊懸臂工法之施工控制作業」，中華技術雜誌，中華民國九十一年一月，第53期。

夢想和幸福
零距離的接軌

技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持。
夢想的城堡、幸福的家園，就座落在不遠的前方。
台灣世曦和您一起攜手而行。用築夢的心、關懷的情，
戮力建設出每一項希望的工程。

高雄輕軌

Creativity · Excellence · Conservation · Integrity