

出國報告（出國類別：考察）

淡江大橋斜張橋風洞試驗及橋梁 美學工作暨施工維管技術計畫

服務機關：交通部公路總局

姓名職稱：夏明勝 副局長

范佑誠 工務員

陳松堂 代理處長

魏維男 課長

洪熒璞 段長

派赴國家：德國、英國

出國期間：105 年 3 月 21 至 105 年 4 月 1 日

報告日期：105 年 5 月

淡江大橋斜張橋風洞試驗及橋梁美學工作暨 施工維管技術計畫 摘要

淡江大橋跨越淡水河出海口，淡水河為臺灣第三大河川，出海口擁有豐富的濕地生態環境與聞名的夕陽落日景觀，如何減少干擾當地生態環境，並結合淡水河口夕照景觀，將是未來淡江大橋設計與施工團隊的最大挑戰。本案第三標由國內中興工程顧問股份有限公司、德國LAP（Leonhardt, Andrä und Partner）與英國ZHA(Zaha Hadid Architects)組成團隊負責設計與監造。其中，斜張橋段由德國LAP負責設計，包含風洞試驗與數值模擬等工作，英國ZHA則負責美學設計。

本次行程由本局夏明勝副局長率隊，中興工程顧問公司與林同棧工程顧問公司亦參與本次行程，前往德國與英國查驗風洞試驗與進行工作討論。本局與各工程設計單位直接面對面溝通，除瞭解目前執行進度外，各方並提出未來可能遭遇之問題，在會議中充分表達看法，使本計畫工作能更有效率。目前風洞試驗正在德國波鴻魯爾大學(Ruhr University Bochum)進行，因此前往風洞試驗室，聽取試驗團隊對整體試驗方法之簡介後，現場展示試驗過程，雙方並對試驗細節進行討論，查核試驗是否依據契約要求進行。

除前述工作討論外，本行程亦參觀位於德國Oberhof之公路行控中心，瞭解當地公路管理單位之養護與營運工作。同時，參觀德國與倫敦地區之橋梁。對橋梁造型與多用途功能設計留下深刻印象，可作為淡江大橋與未來其它橋梁之規劃、設計、施工、維護管理工作之參考。

目錄

一、前言(目的)	1
二、行程略述.....	2
三、工作記要及心得(德國)	3
1. 與 LAP 公司工作討論	3
2. 訪問 Oberhof 行控中心.....	4
3. 查驗風洞試驗成果.....	6
4. 建築與橋梁參觀.....	15
四、工作記要及心得建議(英國)	24
1. 與 ZHA 工作討論	24
2. 建築與橋梁參觀.....	26
五、橋梁美學與城市風貌.....	31
1. 環境特徵	31
2. 色彩與質感	37
3. 結構比例	40
六、結論.....	43

一、前言(目的)

淡江大橋未來將跨越北臺灣淡水河河口，為北臺灣國家門戶，完工後為連結新北市淡水區與八里區的跨河大橋，亦為臺灣第一座輕軌運輸系統與公路共構橋梁。未來完成後將擴大快速公路服務範圍，縮短兩地產業活動及通勤距離，改善淡海新市鎮聯外交通，促進鄰近地區發展，並使北部濱海公路系統更臻完善。淡江大橋路線南起臺北港聯外道路(台 61 甲線)，北迄至淡海新市鎮 1-3 道路止，全長約 6 公里，包含長約 900 公尺主橋及兩端聯絡道，預計 109 年底全線完工通車，將可舒緩台 2 線竹圍路段及關渡大橋交通量，並帶動淡海新市鎮開發。

另新北市政府辦理之八里輕軌延伸線運輸系統將與淡江大橋主橋共構，為國內第一座輕軌與橋梁共構之系統，主橋之設計將力求融合淡水夕照美景，提供休憩功能空間，並串聯淡水河兩岸鄰近遊憩景點，發展成為北海岸旅遊活動遊憩據點之一。

淡江大橋第三標由國內中興工程顧問股份有限公司、德國 LAP 公司 (Leonhardt, Andrä und Partner) 與英國 ZHA 建築師(Zaha Hadid Architects)組成之團隊負責設計與監造工作。其中，斜張橋段由德國 LAP 公司負責設計，包含風洞試驗與數值模擬等工作，英國 ZHA 則負責美學設計。本次行程，中興工程顧問公司與林同棧工程顧問公司陪同本局人員，前往德國 LAP 公司與英國 ZHA 建築師瞭解工作執行進度，並共同討論目前與未來工作執行過程可能遭遇之問題。

由於淡江大橋主要段為斜張橋型式，其空氣動力行為影響安全甚鉅，國外過去曾因對空氣動力行為不瞭解，未考慮其特性而造成橋梁崩潰之案例。因此，為確保淡江大橋之安全，須進行風洞試驗與分析。本項工作由德國波鴻魯爾大學 (Ruhr University Bochum) 負責，本次行程亦前往試驗室，查驗其試驗與分析工作是否依照合約要求進行。除前述工作討論外，亦參觀途經地區之橋梁建設、與德國 LAP 公司與英國 ZHA 建築師所設計之橋梁與建築作品。

此次訪問，本局與所有設計單位面對面相互交換意見，除增進彼此之熟悉與瞭解外，亦建立共同工作之默契，對未來工作之推進有極大幫助。

二、行程略述

本次行程自105年3月21日至4月1日抵臺，前後共歷時12日。整個行程自桃園國際機場出發後，經由香港轉機至德國法蘭克福入境，參訪單位與橋梁主要位於德國境內之法蘭克福與科隆周邊及路途所經地區。3月28日則由德國法蘭克福前往倫敦，參訪單位與橋梁則位於倫敦市區，至3月31日離開英國返臺。詳細之行程內容列如表1 所示。

表1 德國與英國參訪行程表

日期	行程	內容
2016.03.21(一)	台北→香港→法蘭克福	第一站去程
2016.03.22(二)	法蘭克福→斯圖加特→法蘭克福	赴 LAP 公司（Leonhardt, Andrä und Partner）進行工作討論。
2016.03.23(三)	法蘭克福→Oberhof→科隆	訪問 Oberhof 行控中心，參觀 Wlde Gera 大橋。
2016.03.24(四)	科隆→波鴻魯爾大學→科隆	查驗風洞試驗成果。
2016.03.25(五)	科隆→Dusseldorf→Nijmegen(荷蘭)→科隆	參觀 Dusseldorf 斜張橋、Wesel 大橋、Wall 大橋，與附近之橋梁。
2016.03.26(六)	科隆→Trier→法蘭克福	參觀 Trier 大橋。
2016.03.27(日)	法蘭克福→海德堡→法蘭克福	參觀海德堡舊橋。
2016.03.28(一)	法蘭克福→倫敦	第二站去程
2016.03.29(二)	倫敦	赴 ZHA 建築師事務所(Zaha Hadid Architects) 進行工作討論。參觀 Rolling Bridge、Merchant Square footbridge、Hungerford Bridge 等。
2016.03.30(三)	倫敦	參觀奧運水上運動中心、千禧橋、倫敦塔橋等。
2016.03.31(四)	倫敦→香港	回程
2016.04.01(五)	香港→台北	回程

三、工作記要及心得(德國)

1. 與 LAP 公司工作討論

本次討論參與單位包括本局、中興工程顧問公司、林同棧工程顧問公司與 LAP 公司之計畫主持人與工程師等。首先由 LAP 公司介紹淡江大橋之設計理念與技術考量，並介紹過去該公司自 1939 年成立之後，所設計之橋梁及建築。之後，各方就細部設計時程、縱坡、平面線形、耐震設計(含景觀燈柱)、耐久性設計等議題進行討論，藉由此次討論，各方充分交換意見，瞭解彼此看法，藉由增進相互之熟悉度，將有助於未來工作之進展，如圖 3.1-1~4 所示。



圖 3.1-1 工作討論

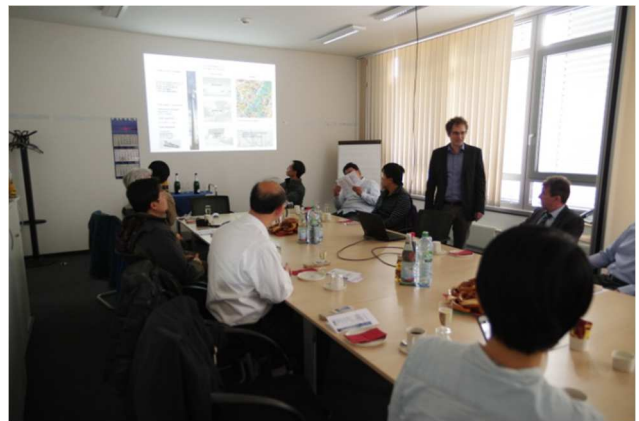


圖 3.1-2 工作討論



圖 3.1-3 工作討論

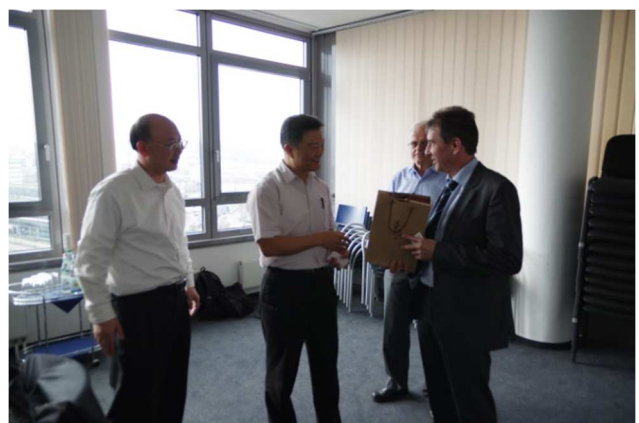


圖 3.1-4 交換禮物

會後，隨 LAP 公司工程師前往斯圖加特電視塔參觀，該塔由 LAP 公司設計，為全世界第一座此類造型之電視塔，塔高 217 公尺，基礎直徑 27 公尺，完工於

1956 年，如圖 3.1-5 所示。位於 150~153.5 公尺設有兩層景觀台，並設有咖啡廳供遊客休憩。



圖 3.1-5 斯圖加特電視塔

2. 訪問 Oberhof 行控中心

按照德國法規，行控中心須具備隧道監控，控制，故障診斷和維護操作等功能，包含：

- (1) 通風和照明控制
- (2) 關閉隧道
- (3) 提供使用者信息和警示
- (4) 可以迅速處理交通意外

Oberhof 行控中心因此設立，並於 2003 年 7 月完工，GBI Gackstatter 公司接受委託進行規劃和施工，監測電視牆 240cmx900cm，由 30 台 TFT 螢幕組成，用來監控圖林根州高速公路隧道與路況，任何時間均維持兩人進行監控，如圖 3.2-1 所示。行控中心亦設有警察隊與消防隊，以處理公路意外狀況。如有車輛在隧道內停止，監控設備可立即偵測並定位，必要時出動救援車輛進行處理。

由於圖林根森林海拔高度在 500- 660 公尺，該區域多隧道與橋梁，故行控中心設於此地。山谷地形造成橋梁可能承受較大風速，進而危害車輛安全。因此，當風速達 11m/s 時，車速將限制在 90km/h 以下；風速達 22m/s 時，小型車輛速限將再降低，而大型車輛禁止通行；風速達 33m/s 時，所有車輛將禁止通行。

行控中心除配有如剷雪車等維護公路運作之車輛外，其消防隊配有多功能之救援車輛數十輛，例如指揮車、救護車、小型與大型多功能消防車…。其中，指揮車具防火功能，小型多功能消防車可在隧道內迅速通行優先抵達瞭解狀況，其緊急應變功能之完整性令人印象深刻，如圖 3.2-2~8 所示。



圖 3.2-1 監控平台



圖 3.2-2 行控中心人員說明功能



圖 3.2-3 行控中心剷雪車



圖 3.2-4 警察隊與消防隊大樓



圖 3.2-5 消防車輛



圖 3.2-6 消防隊長介紹車輛功能



圖 3.2-7 消防隊內之監控系統



圖 3.2-8 夏副局長與隊長握手致謝

3. 查驗風洞試驗成果

由於懸索橋與斜張橋對於空氣動力效應極為敏感，因此，其設計通常須進行空氣動力研究，以確保其安全性。淡江大橋屬斜張橋型式，故設計亦須進行空氣動力研究，本計畫之風洞試驗與分析由波鴻魯爾大學(Ruhr University Bochum)負責。到達波鴻魯爾大學後，由試驗負責人介紹空氣動力學之基本概念、試驗方法與實務應用，如圖 3.3-1~2 所示，主要內容說明如後：

對於懸索橋與斜張橋而言，空氣引致之振動主要包括下列類型：

1. 顫振(Flutter)

顫振主要包含兩種振動模態：扭轉與垂直運動。此類型振動對於橋面版

斷面形狀相當敏感。對於深寬比大之橋面版，可能僅出現純扭轉模態；對於深寬比小或具流線型斷面之橋面版(此為典型之橋面形狀)，則同時出現扭轉與垂直運動模態，如圖 3.3-1 所示。若橋面版之扭轉勁度較小，導致產生顫振之臨界風速較低。橋面版邊緣形狀對穩定性非常重要，影響發生顫振之臨界風速。扭轉模態發生時，其臨界速度可視為空氣動力導致總扭轉阻尼小於零情形，即振動不斷擴大，直至橋梁崩潰。而更高之風速，將會加速崩潰之發生。因此，橋梁發生顫振之設計風速必須遠高於工址可能發生之風速。

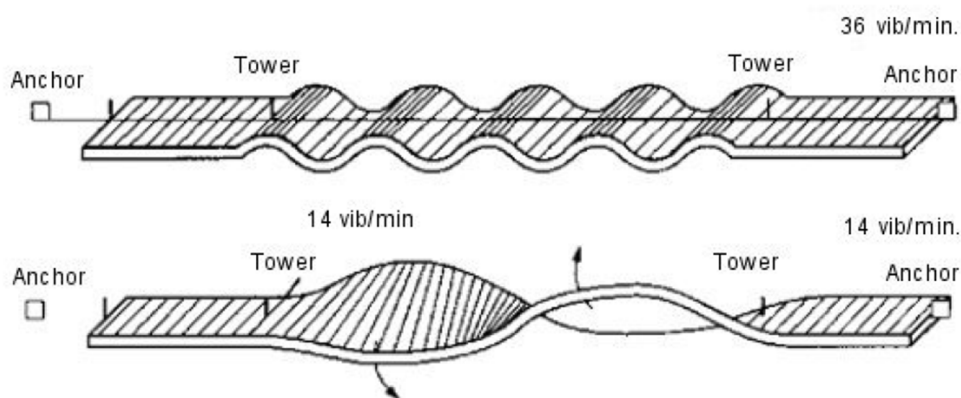


圖 3.3-1 顫振之振動模態

2. 渦激振動(Vortex-induced excitation)

渦激振動源於氣流繞過物體兩側，產生交替性旋渦並使結構產生向兩側反覆搖擺之振動，如圖 3.3-2 所示。若此反覆搖擺頻率接近結構自然頻率，結構將因共振效應而振動。一旦渦激振動產生，即使風速發生些微改變，渦流產生頻率仍將「鎖住」結構自然頻率，保持共振。然而，渦流經常僅出現在某段風速狹窄區間，且在極低風速情況下發生。因此，其振動明顯出現在氣流平順時，且隨風之擾流增加而減少。渦激振動不像顫振會產生巨大振幅，若振幅不影響結構強度，並不因此型振動導致破壞。然而，對於具低阻尼之輕量橋面版，可能造成明顯之振幅，造成橋上用路者不適、甚至驚慌，最後亦可能因長期振動而發生疲勞破壞。

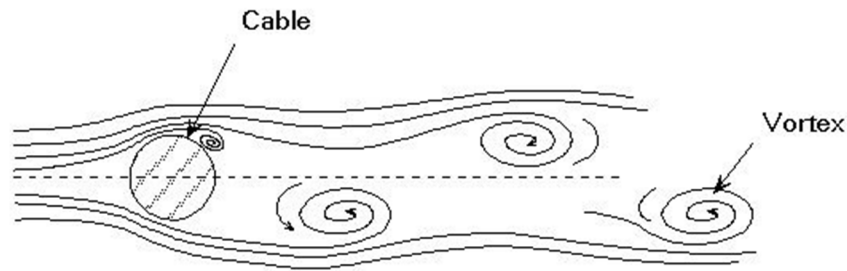


圖 3.3-2 渦激振動模式

3. 抖振(Buffeting)

抖振屬於紊流造成之隨機振動，其產生之橋梁風載與風速呈正比。在高風速作用下，橋梁將產生極大振幅，對結構產生明顯動力。預測抖振之主要目的係確保橋梁在紊流作用下，結構不產生過高應力而破壞，並避免疲勞損壞。風向會影響橋梁抖振，最糟狀況為風向與橋面版垂直。然而，在橋梁施工期間，最惡劣狀況未必發生於上述情形，須端視所考慮之桿件而異。因此，在風洞試驗中必須考慮各個風向產生之紊流，以尋找最惡劣之風載情境與結構位移。

風洞試驗用於估計結構反應，並決定設計參數，模型試驗通常包括：

1. 斷面模型(sectional model)試驗

本試驗應用於初步設計階段，評估橋面版之氣動力穩定性，並依據試驗成果調整設計斷面形狀，以增加發生顫振之臨界風速，減少渦激振動之機會。斷面模型須具高剛性，其材料通常為鋁、鋼或木製品，本計畫風洞試驗模型使用之材質為木製品。試驗模型尺寸比例視風洞尺寸而定，本計畫之試驗採 1:120，該模型包含所有橋面版細部。進行斷面模型與受迫振動試驗時，固定兩端以取得空氣動力參數。進行自由振動試驗時，將模型置於具垂直與旋轉勁度之彈簧支撐上，並可藉由調整彈簧支撐距離改變模型垂直與旋轉自由度之自然頻率比，如圖 3.3-3 所示。

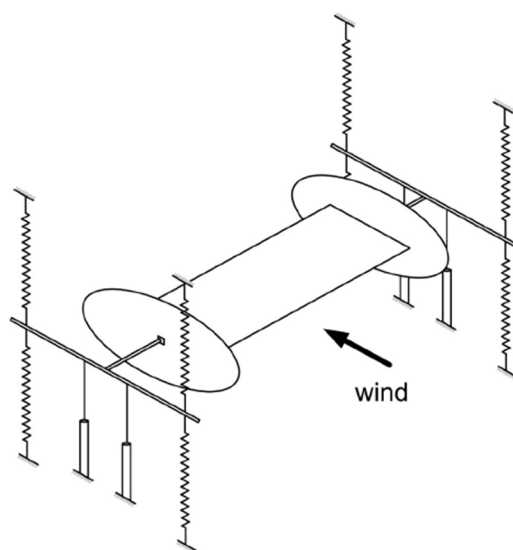


圖 3.3-3 斷面模型支撐示意

此試驗主要採用平順氣流，以不同攻角與流速進行測試，以瞭解橋面版之基本氣動特性。在各個攻角之模擬情境內，風速逐漸增加至出現顫振或達風洞最大輸出風速為止。因此，試驗前須考量風洞最大輸出風速能否滿足需求。紊流情況亦應納於試驗內，雖不可能透過斷面試驗完整模擬自然風之紊流，但可模擬高頻紊流造成之振動。斷面試驗考量之結構阻尼通常設定在低水平，對於斜張橋而言，阻尼大約在 0.5%~1.0%間。

經由試驗量測之橋面版模型拖曳力(Drag force)、升力(Lift force)與彎矩(pitching moment)等，可從空氣密度、風速與模型尺寸，計算獲得上述力量與彎矩等係數，作為設計風力依據。在風洞模型附近設有皮托管(pitot tube)量測試驗風速，作為各項係數計算之依據。

2. 整體氣彈性模型(full aeroelastic model)試驗

本試驗經常應用於最後設計階段，將整體橋梁納入模型內，進一步評估無法在斷面模型試驗中顯現之因素，例如三維氣動力效應、風向效應與複雜地形效應。

此試驗通常考量下列兩種風洞產生之氣流：

(1) 平順氣流(smooth flow)：目的在產生並檢視渦激振動反應，及獲得導致顫振之臨界風速。

(2) 紊流(turbulence flow)：由於自然風在高風速時總會產生紊流，故目的在獲得結構在強風下之真實反應。

自然風之平均氣流剖面(velocity profile)與紊流強度(turbulence intensity)可利用紊流產生器(turbulence generator)在上風區模擬製造，工址周圍地形(包含建築物)可納入地面模型進行模擬。須注意的是，自然紊流尺度變化極大，紊流積分尺度(turbulence integral scale)之模擬並不精確。受風反應之敏感性在對整體可能之變量，需要一些考量。由於紊流長度尺度(turbulence length scale)原因，需運用抖振理論分析評估其衝擊。

3. 數值模擬(Numerical simulation)

早期電腦科技尚不發達，相關研究均在實驗室內進行風洞試驗，以獲取橋梁相關之空氣動力參數。近三十年來，電腦科技與計算流體動力學(computational fluid dynamics)技術大幅成長，計算工具可使用叢集(cluster)系統進行平行運算大幅減少計算時間，並降低成本。由於實驗受限於空間，僅能以縮尺寸模型進行試驗，其成果與真實結構間之行為存在差異。在相同假設下，利用流體動力學之數值計算方法可模擬真實結構尺寸與環境，其成果可能較試驗更接近實際狀況。因此，利用數值方法計算流體與結構行為逐漸成為趨勢。

目前已正進行橋梁與橋塔之斷面試驗，未來將進行受迫振動試驗、自由振動試驗、與全橋氣動彈性模型試驗，並採用取得之空氣動力參數配合數值模擬，以瞭解淡江大橋之空氣動力特性，以確保其安全性。試驗團隊介紹之詳細實施內容與風洞試驗服務實施計畫內容相同。其考慮之斷面包含各個階段，如圖 3.3-4~6 所示。

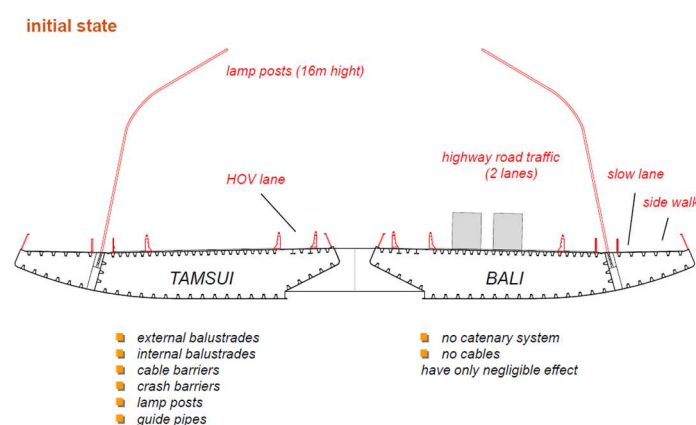


圖 3.3-4 初始階段之橋梁斷面

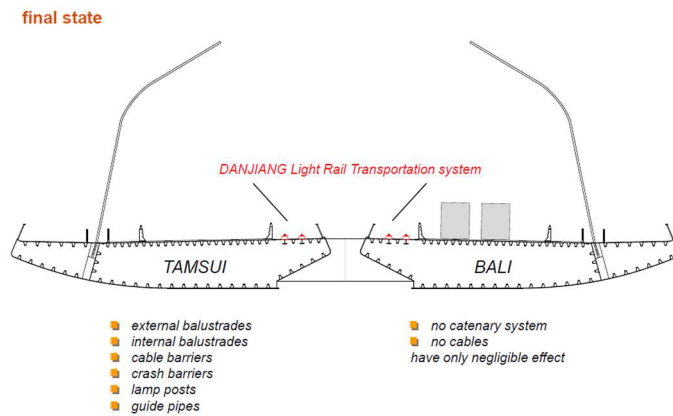


圖 3.3-5 最終階段之橋梁斷面

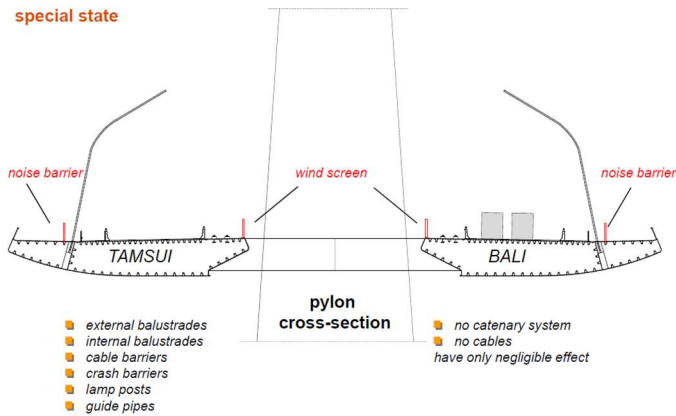


圖 3.3-6 橋塔旁之橋梁斷面

燈柱、車輛、護欄…等設施均納入變化斷面模型，並考量四種鋼梁間距，進行風洞試驗，如圖 3.3-7 所示。

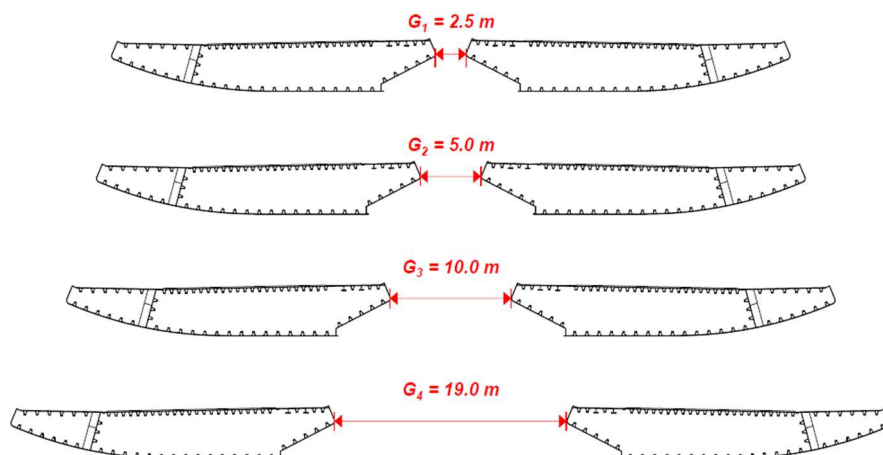


圖 3.3-7 考量之鋼梁間距

試驗所得之空氣動力參數將作為數值分析之輸入參數，主要包括拖曳係數(drag coefficient)、上昇(lift coefficient)、及扭轉係數(moment coefficient)等，其定義如圖 3.3-8 所示。

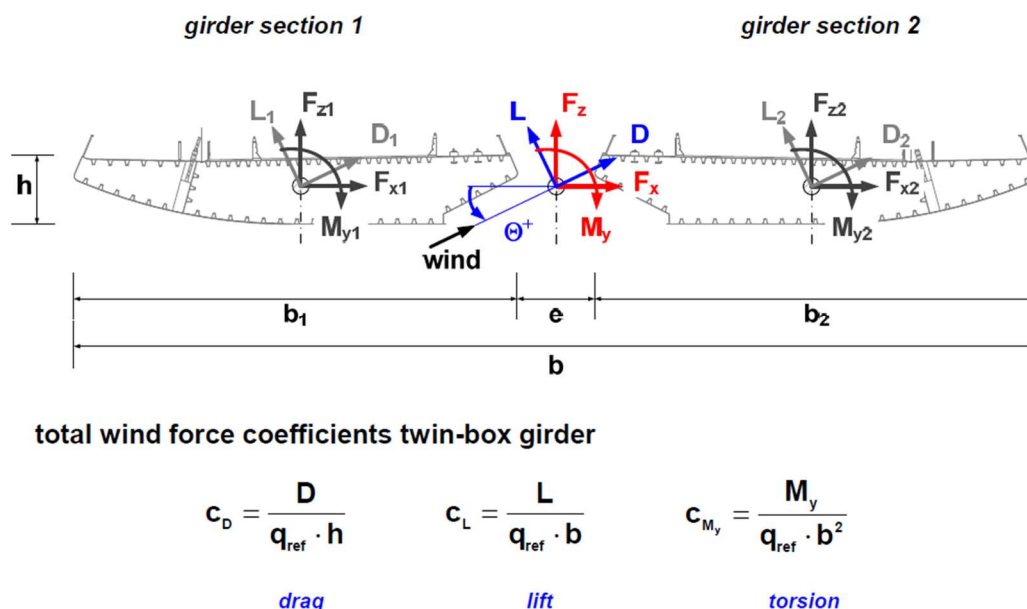


圖 3.3-8 空氣動力參數

波鴻魯爾大學風洞試驗團隊完成介紹後，雙方進行工作討論，如圖 3.3-9~12 所示。隨後參觀風洞試驗室，如圖 3.3-13~18 所示，並當場就試驗相關問題提出討論，包括：

- (1) 設計燈柱隨高度變化，最高為 35 公尺，但斷面試驗均高，需否採用不同高度？試驗團隊回覆，斷面試驗採用相同高度，係為初步試驗。
- (2) 風洞試驗各階段何時可完成？試驗團隊回覆，期中報告將於 105 年 4 月中提出，期末報告於 9 月提出。
- (3) 試驗進度是否會影響設計時程？試驗團隊回覆，LAP 與風洞試驗團隊密切聯繫，不影響設計進行與時程。
- (4) 擋風柵是否產生噪音影響行人？試驗團隊回覆，擋風柵僅在橋墩左右，其噪音不影響行人。
- (5) 河中之糙度如何考慮？試驗團隊回覆，可由上游河床面鋪設塊形物進行模擬。
- (6) 試驗是否考慮橋面與水面距離？試驗團隊回覆，已依比例調整模型距底

面高度，以符合橋梁淨高需求。

- (7) 斷面模型是否考慮施工狀態？試驗團隊回覆，已納入試驗中。
- (8) 自動振動試驗之斷面模型是否調整結構頻率？試驗團隊展示試驗將採用之彈性鋼架，調整彈簧改變結構頻率。
- (9) 試驗否錄影？試驗團隊回覆，有進行錄影存證作業。
- (10) 雷諾數是否量測？試驗團隊回覆，依據試驗數據進行計算。

以上僅呈現部分問題。此外，本次行程包含查核風洞試驗內容，亦對查核項目逐項進行檢視與詢問。



圖 3.3-9 介紹試驗理念與方法



圖 3.3-10 介紹試驗理念與方法



圖 3.3-11 工作討論



圖 3.3-12 工作討論



圖 3.3-13 工作討論

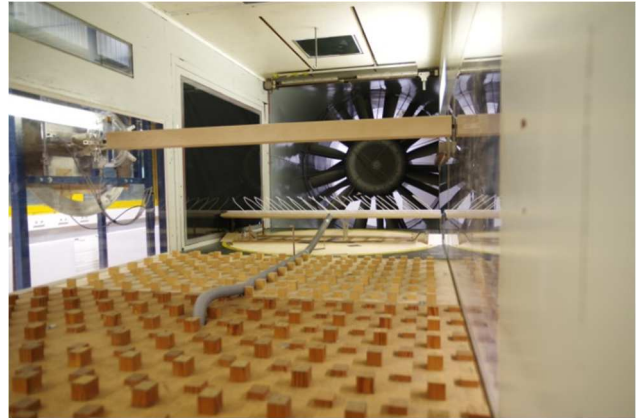


圖 3.3-14 風洞試驗設備



圖 3.3-15 斷面模型



圖 3.3-16 斷面試驗



圖 3.3-17 氣彈性試驗模型

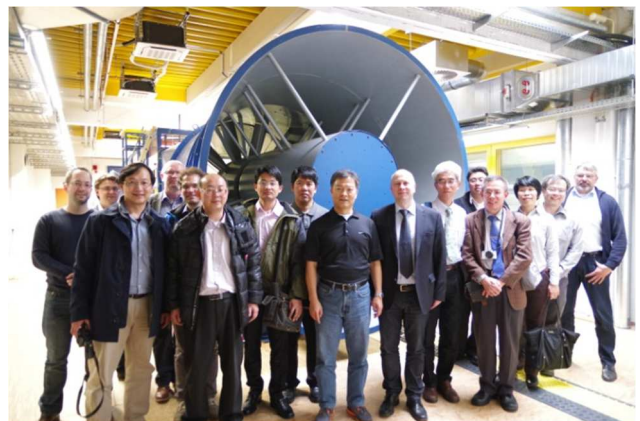


圖 3.3-18 參與人員於風洞試驗室

4 建築與橋梁參觀

(1) Wilde Gera 橋

此橋為上路式鋼管斜撐混凝土拱橋，拱體採懸吊式施工，共 14 跨，跨徑配置為 30+36+10@42+30+36，全長 552m，110m 高，橋面全寬 26.3m，為德國境內最大、最高之混凝土拱橋，如圖 3.4-12~13 所示。原基本設計為直立橋柱，如圖 3.4-1 所示，在細設階段，統包商為減少施工複雜度並節省經費，將橋梁支承系統改為拱型，如圖 3.4-2 所示。

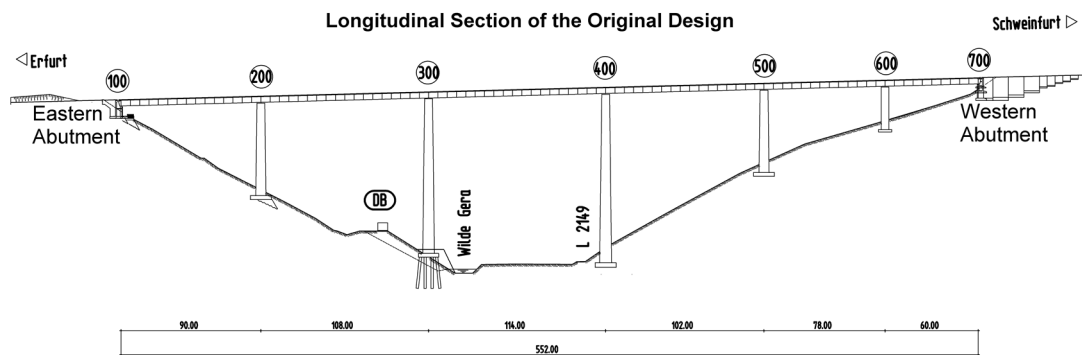


圖 3.4-1 Wilde Gera 橋原設計橋型

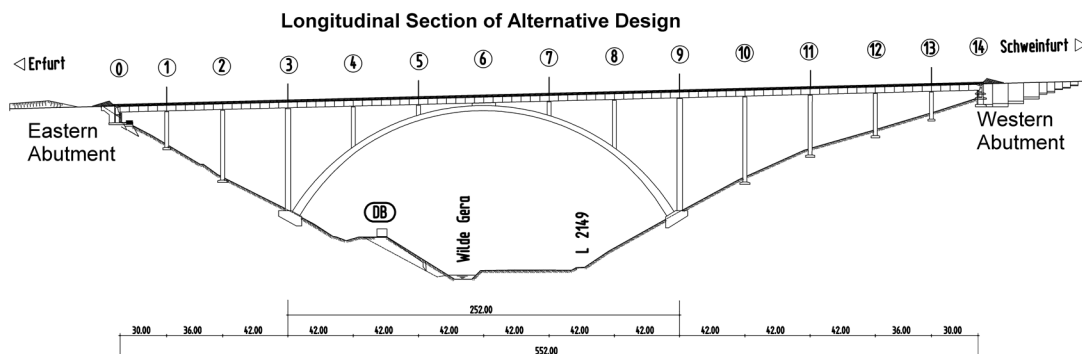


圖 3.4-2 Wilde Gera 橋最終設計橋型

該變更設計包含：

- 平面曲率由 5200 公尺增加至 7800 公尺，以減少橋柱在拱結構上之偏心。
- 整座橋向西移動 3 公尺，以符合橋拱之對稱性。
- 調整後之兩端起拱高程相同，增加其美觀性。

- d. 由於鐵路穿越橋梁底部，為保留鐵路足夠淨空及保證起拱處之良好岩石條件，橋拱跨度 $6 \times 42 = 252$ 公尺為最佳狀態。

橋拱施工步驟及現況如圖 3.4-3~9 所示：

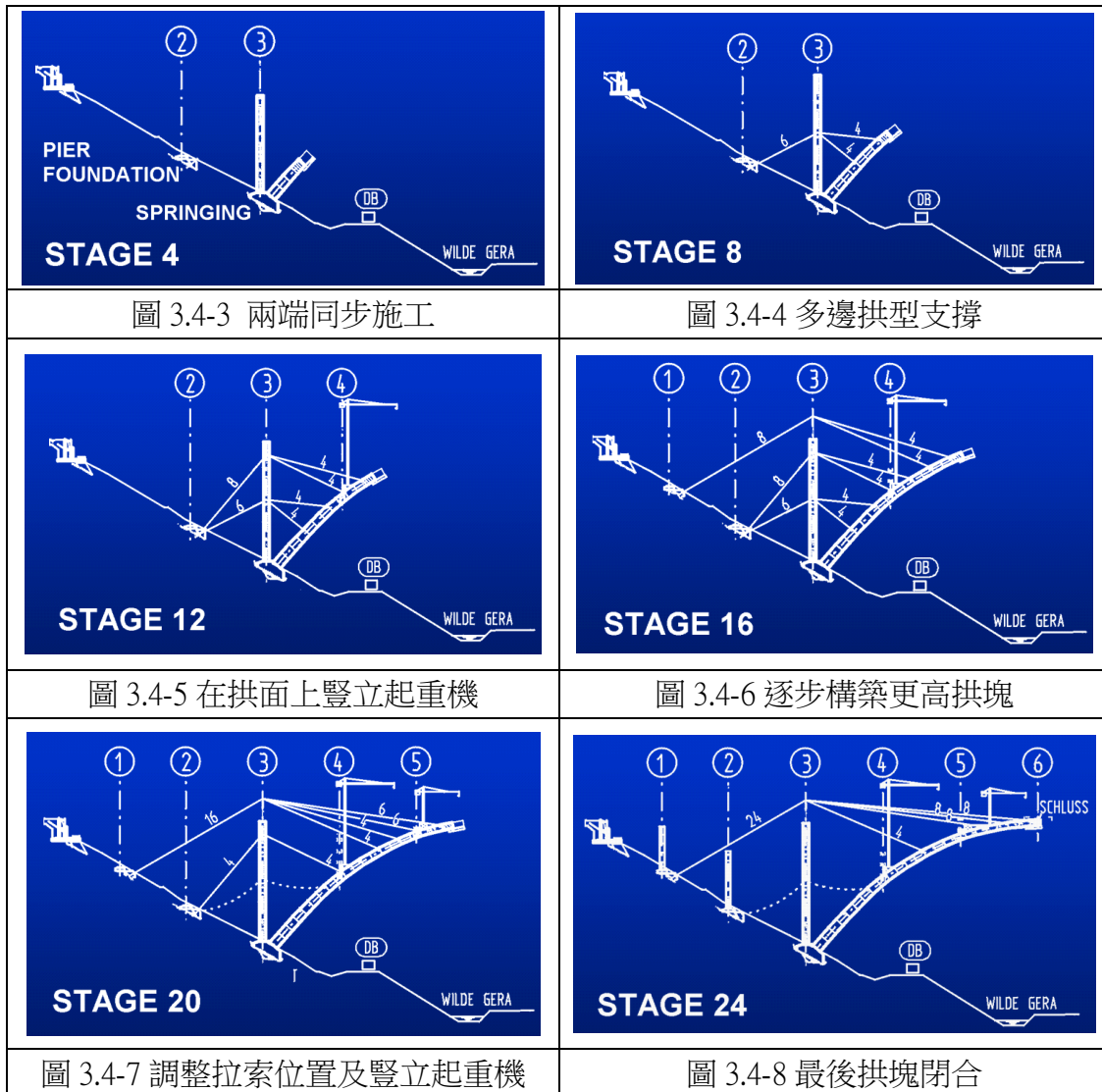


圖 3.4-9 施工當時狀況

橋面板由兩座模板單元，現場澆灌，向橋墩推進，如圖 3.4-10~11 所示。



圖 3.4-10 橋面板推進施工(一)



圖 3.4-11 橋面板推進施工(二)

(2) 科隆 Severins 橋

該橋位於科隆市區，為橫跨萊茵河結合輕軌、汽車、自行車與人行道之斜張橋，藉此了解軌道伸縮縫的設置形式，可為淡江大橋後續輕軌軌道伸縮縫設置之參考，如圖 3.4-14~17 所示。橋梁下方設有維護吊車，形式輕便，便於隱藏減少對周遭環境的影響，且便於進行日常檢修。

(3) 科隆 Rheinauhalbinsel 橋

該橋舊式鉚接鋼桁架橋，其下方設有轉盤，可使橋梁轉動，讓船隻通行，如圖 3.4-18~19 所示。由於此型結構在施工時須耗費大量人力處理接頭，目前一般橋梁已不採用此型結構，但可轉動之設計為此橋之特色。

(4) 科隆 Deutzer 橋

為科隆市區跨萊茵河之主要橋梁之一，為因應增加之交通量，在舊鋼橋旁增設混凝土橋，並擴大橋墩，如圖 3.4-20~21 所示，國內常見此類之混凝土橋型。

(5) 科隆 Hohenzollern 橋

位於科隆的一座跨越萊茵河之鐵路橋梁，於 1907 年至 1911 年建成，原來由兩座鐵路橋和一座公路橋平行組成。1945 年重建時只建造了兩座鐵路橋，後來又增添了第三座鐵路橋。為了取代沒有重建的公路橋在鐵路橋的外側增添了人行和自行車通道，如圖 3.4.22~23 所示。

(6) 杜塞爾多夫 Rheinknie 橋、Oberkasseler 橋、Parlamentsufer 橋

Rheinknie 橋(圖 3.4-24~25)與 Oberkasseler 橋(圖 3.4-26~27)均為斜張式公路橋，而 Parlamentsufer 橋(圖 3.4-28~29)為自行人與人行橋，三座為跨萊茵河彼此相鄰之橋梁。由於當地水路為重要運輸方式，因此橋梁多採斜張橋以提高跨度避開航道。其中，Rheinknie 橋啟用於 1969 年，具 2 座高 114.1 公尺之橋塔，長 1518.89 公尺，寬 30 公尺；Oberkasseler 橋斜拉橋啟用於 1976 年，具 1 座高 104 公尺橋塔，長度 614.72 公尺，寬度 35 公尺，跨度 257.75 公尺。

(7) Weseler 橋

啟用於 2009 年，長度 772 米，具有四線車道和自行車道與人行混合道，具 130 公尺高橋塔之斜張橋，如圖 3.4-30~33 所示。

(8) Nijmegen De Oversteek 橋

位於荷蘭 Nijmegen，啟用於 2013 年，總長度 1400 公尺，最長跨度 285 公尺，如圖 3.4-34~35 所示。道路一側設有自行車與人行混合通道，其與車道間設有玻璃牆以隔開車輛通過產生之噪音。

(9) Trier Hochmosel 橋

目前該橋正在施工，總長度 1702 公尺，寬度 29 公尺，最長跨度 209.5 公尺，高度 158 公尺，如圖 3.4-36~37 所示。

(10) 海德堡 Alte 橋

德國海德堡內卡河上的一座橋梁，長 200 米，寬 7 米，它連接海德堡老城與內卡河對岸的 Neuenheim 區。海德堡地區最初之橋梁建於古羅馬時期，橫跨內卡河之木橋。羅馬時代以後，海德堡近千年時期內沒有橋梁。大約在 12 世紀末到

13 世紀初，內卡河上才再度建橋。這些橋梁壽命都不太長久：1288 年、1308 年、1340 年、1400 年、1470 年，先後有 5 座橋被冰摧毀。目前的老橋由卡爾·特奧多（Karl Theodor）興建於 1788 年，已經是這個地點修建的第 9 座橋梁。如今，老橋是海德堡的著名景點之一，如圖 3.4-38~39 所示。



圖 3.4-12 Wilde Gera 橋



圖 3.4-13 Wilde Gera 橋



圖 3.4-14 科隆 Severins 橋



圖 3.4-15 科隆 Severins 橋



圖 3.4-16 科隆 Severins 橋



圖 3.4-17 科隆 Severins 橋



圖 3.4-18 科隆 Rheinauhalbinsel 橋



圖 3.4-19 科隆 Rheinauhalbinsel 橋



圖 3.4-20 科隆 Deutzer 橋



圖 3.4-21 科隆 Deutzer 橋



圖 3.4-22 科隆 Hohenzollern 橋



圖 3.4-23 科隆 Hohenzollern 橋



圖 3.4-24 杜塞爾多夫 Rheinknie 橋



圖 3.4-25 杜塞爾多夫 Rheinknie 橋



圖 3.4-26 杜塞爾多夫 Oberkasseler 橋



圖 3.4-27 杜塞爾多夫 Oberkasseler 橋



圖 3.4-28 杜塞爾多夫 Parlamentsufer 橋



圖 3.4-29 杜塞爾多夫 Parlamentsufer 橋



圖 3.4-30 Weseler 橋



圖 3.4-31 Weseler 橋



圖 3.4-32 Weseler 橋



圖 3.4-33 Weseler 橋



圖 3.4-34 Nijmegen De Oversteek 橋



圖 3.4-35 Nijmegen De Oversteek 橋



圖 3.4-36 Trier Hochmosel 橋



圖 3.4-37 Trier Hochmosel 橋



圖 3.4-38 海德堡 Alte 橋



圖 3.4-39 海德堡 Alte 橋

四、工作記要及心得建議(英國)

1. 與 ZHA 工作討論

首先 ZHA 團隊先展示 15 分鐘淡江大橋橋梁美學宣傳片，如圖 4.1-1 所示，結束後本局就影片內容提出意見，主要包括：

1. 影片標題不需採用本案名稱「淡江大橋及其連絡道路新建工程(第 3 標)」，對一般民眾採用「淡江大橋」即可。
2. 另製作濃縮版之三分鐘影片，供民眾可在利用較短時間瞭解宣傳內容。
3. 口白內容需要部分修改。

隨後，ZHA 團隊介紹過去設計之作品模型，並展示最新之 3D 虛擬實境製作成果。我方成員均戴上設備，體驗虛擬實境之呈現效果。體驗者頭部可 360 度轉動模擬站在淡江大橋，觀看四周景象，並可隨著體驗者之腳步移動而改變視野，如圖 4.1-2~8 所示。

由於橋塔為混凝土變斷面曲線結構，模板系統對其表面美觀有極大影響，因此，雙方就模板系統與採購法之限制性進行討論，如圖 4.1-9~10 所示。同時，亦討論未來展示館之展示內容及營運模式。



圖 4.1-1 ZHA 團隊介紹最新展示影片



圖 4.1-2 ZHA 團隊介紹其設計傢俱作品

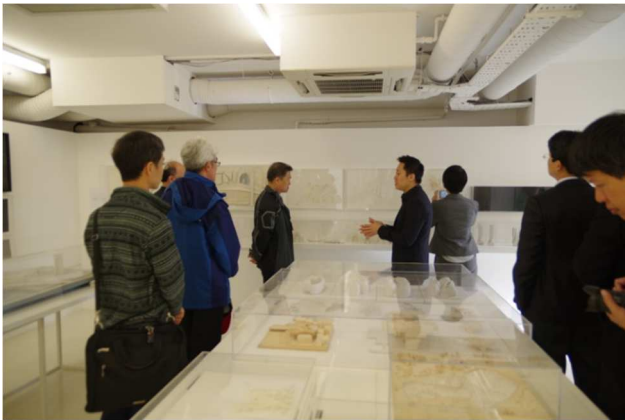


圖 4.1-3 ZHA 團隊介紹其設計建築作品



圖 4.1-4 ZHA 團隊之設計建築作品



圖 4.1-5 交換禮物



圖 4.1-6 與 ZHA 團隊合影

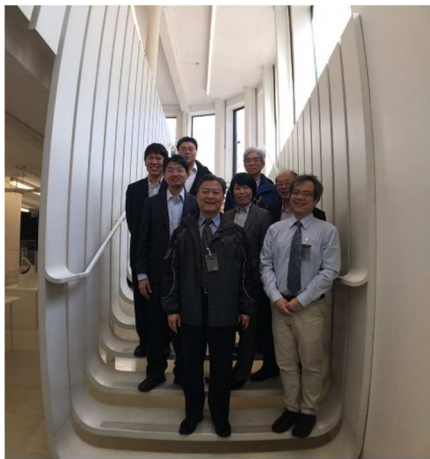


圖 4.1-7 參訪團隊合影



圖 4.1-8 體驗 3D 虛擬實境成果



圖 4.1-9 橋塔模板施作討論

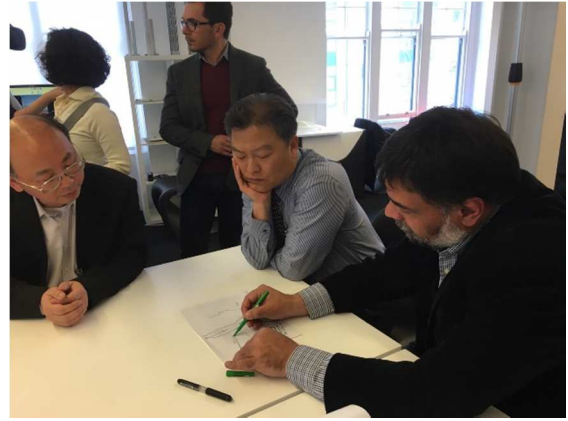


圖 4.1-10 橋塔模板施作討論

2. 建築與橋梁參觀

(1) Merchant Square 人行橋

此橋位於商人廣場(Merchant Square)，為活動式人行橋，橋面由五片 7 噸重鋼製橋板組成，類似於東方傳統折扇之概念，配合液壓式千斤頂的操作方式及一個 40 噸重的起重機支撐舉起，讓船隻通過，每根鋼柱必須保持不超過 3mm 之間隔，以保持橋梁開啟時之準確精度，如圖 4.2-1~2 所示。

(2) Rolling 橋

此橋位於商人廣場(Merchant Square)，為活動式人行橋，由 8 段三角形的結構組成，共 12 米長。橋身可自動卷起呈圓環形，使得船隻順利通過，如圖 4.2-3~4 所示。

(3) Hungerford 橋

此橋為英國倫敦中心區泰晤士河上的鐵路橋，位於滑鐵盧橋和西敏橋之間。橋北端就是查令十字車站，建於 1864 年，取代了原先坐落於此的另外一座橋梁。2002 年在其兩翼建造了步行橋五十週年紀念橋，該結構系統由鋼管與鋼索組成，造成型獨特，如圖 4.2-5~8 所示。

(4) 倫敦塔橋

此橋完成於 1894 年，為長 244 公尺之開啟橋，具兩座橋塔，每座塔高 65 米。橋的中部長 61 米，分為上下 2 層。上層高而窄，可作為人行道。下層是主通道，分為兩扇橋段，每扇可以豎起到 83 度來讓河流交通通過。這兩扇橋段各重上千

公噸，其軸心位於重心以減少舉昇所需之力量，並可在一分鐘內升起。原昇降裝置係為液壓式，現改用電動機，如圖 4.2-9~12 所示。

(5) 千禧橋

千禧橋是橫跨英國倫敦的泰晤士河的一座懸索橋，全長 325 公尺，於 2000 年 6 月 10 日正式開放，但由於大橋出現搖擺及振動，千禧橋只開放了三天，當局便暫停使用。設計時，並未預期此振動模式，後來採用 37 個流體粘滯阻尼器與 52 個調諧質量阻尼器來控制垂直運動，於兩年後重新開放，如圖 4.2-13~14 所示。

(6) 倫敦橋

此橋為橫跨泰晤士河之預力混凝土箱形梁橋，總長度 269 公尺，寬度 32 公尺，於 1973 通車，如圖 4.2-15 所示。

(7) 奧運水上運動中心

此室內水上運動中心為本計畫設計團隊 ZHA 代表作之一，有兩座 50 公尺游泳池和一座 25 公尺跳水池，為 2012 年夏季奧林匹克運動會的主要場館之一。波浪屋頂由 3 座實心混凝土柱搭配桁梁結構支撐。建造過程中所產生的鋼廢料盡可能回收再利用，因此減少了約 50% 的混凝土用量。在奧運期間，設置 17,500 個座位，比賽結束後，將外側臨時沿伸結構拆除，縮減成 2500 個座位，如圖 4.2-16~18 所示。

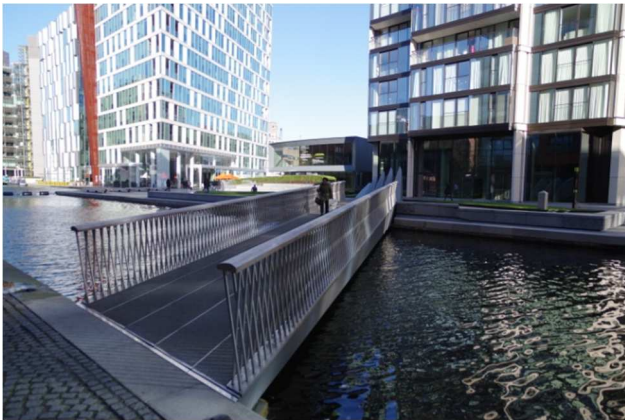


圖 4.2-1 Merchant Square 人行橋

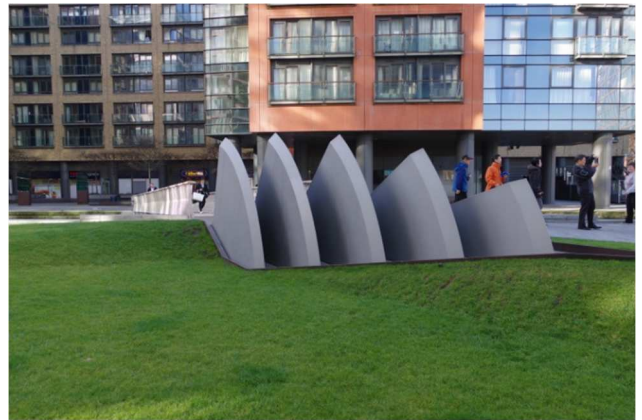


圖 4.2-2 Merchant Square 人行橋



圖 4.2-3 Rolling 橋



圖 4.2-4 Rolling 橋



圖 4.2-5 Hungerford 橋



圖 4.2-6 Hungerford 橋



圖 4.2-7 Hungerford 橋

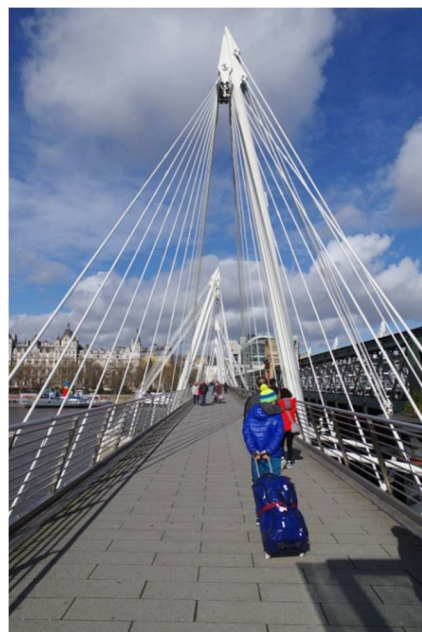


圖 4.2-8 Hungerford 橋



圖 4.2-9 倫敦塔橋

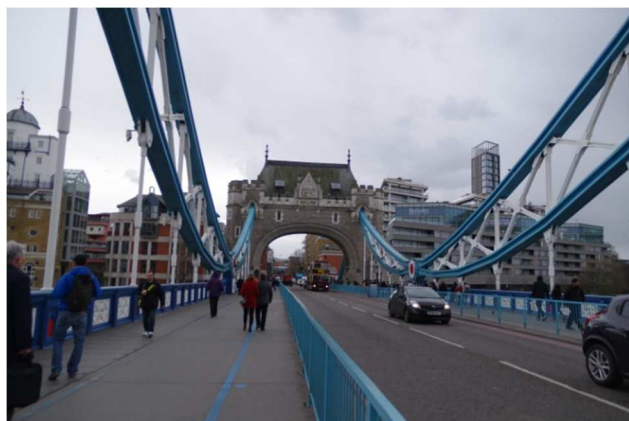


圖 4.2-10 倫敦塔橋



圖 4.2-11 倫敦塔橋



圖 4.2-12 倫敦塔橋



圖 4.2-13 千禧橋



圖 4.2-14 千禧橋



圖 4.2-15 倫敦橋

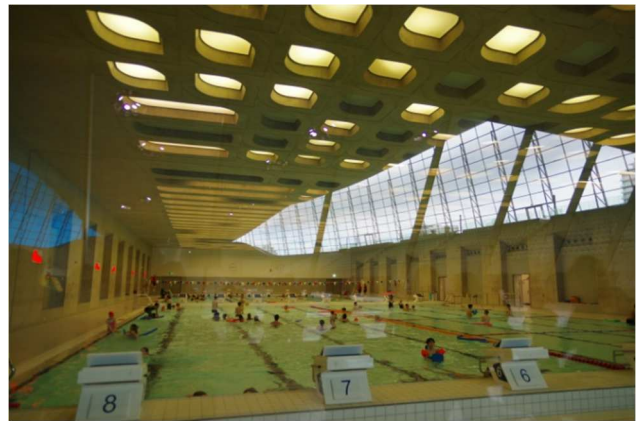


圖 4.2-16 奧運水上運動中心

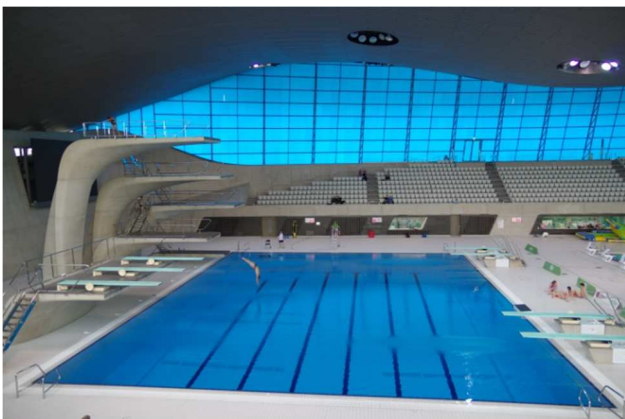


圖 4.2-17 奧運水上運動中心

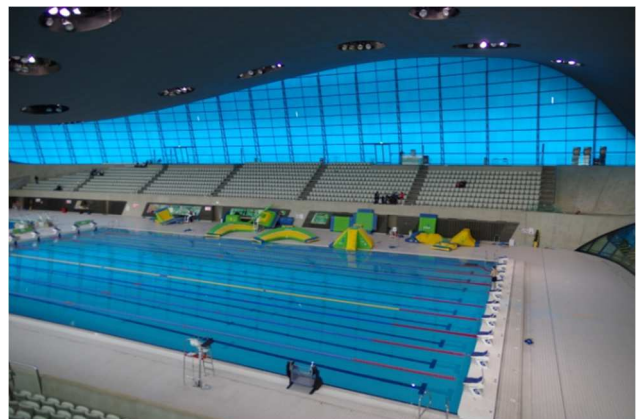


圖 4.2-18 奧運水上運動中心

五、橋梁美學與城市風貌

大多數發展歷史悠久的城市都有一條美麗的河川，而跨越河川的橋梁往往成為當地重要的景色，此趟行程途經德國、荷蘭與英國數十座橋梁，故得以飽覽各橋、河川與城市的風光，讓我們可以體驗在這些有特色的歷史城市中，橋梁扮演了塑造交通與城市風貌的極重要角色，特別是在都市中心的橋梁，更是敞開雙臂迎接來自世界各國遊客的到訪，透過步行來細細領略城市中歷史、環境與文化的美感。橋梁設計總是兼具著造型與空間之美，從城市眺望的觀點來看，河川提供了一定的寬度，使得優美合宜的橋梁成為公眾注目的焦點；從經過橋梁內部向城市眺望，旅人總是樂意在橋上停留，以城市作背景留下他們曾經到訪的印記。

近十年來台灣橋梁設計也在進步中，在滿足工程與交通機能外，橋型設計也日漸得到注目，特別是近年來各地的步行橋與吊橋的設計各顯特色，雖然得到觀光宣傳，但僅多注重橋型本身結構型態與外型語彙，對於周遭環境的認識與融合，相關的美學考量顯然不夠充分，總是有橋梁以標新立異的造型或是光彩炫目的燈光取勝。公共工程是百年的建設，在發展工程技術的同時，選擇對環境與美感更有幫助的方案，導入工程美學的考量，在規劃橋梁系統的同時，加入宏觀與微觀的分析，從加法到減法來推動各專業的整合，讓構造物與景觀、生態及復育、環境營造可以有良性的對話。具體做法可以是在規劃初期讓橋梁工程設計與環境分析並行，透過分析提煉出工程與環境的特色，有助於發展適合的橋型與設計語彙。而美學考量可以利用城市觀察的幾個角度，以環境特徵、色彩與質感以及結構比例來探討，這也是在本次考察旅程中重要的收穫之一，透過親臨這些橋梁所在具體環境，讓我們看見這些作品的用心，分別說明如下。

1. 環境特徵

橋梁所在地周遭的環境描述，是都市中心或是非都市的山野空間，對於橋型所傳達的設計語彙是否得宜有著重要的影響。以流經義大利佛羅倫斯的阿諾 (Arno) 河上的老橋 Ponte Vecchio 為例，如圖 5.1-1~2 所示，根據歷史記載大約最初於西元 996 年興建，它歷經各樣的天災與戰爭破壞，到目前雖以現代的材料修建，一樣維持與四周城市風貌融合，保有在中古世紀的城市整體美感。這樣的作法顯示對四周整體環境的尊重，讓橋梁與城市發展共生，而成為佛羅倫斯重要的地標與觀光勝地。



圖 5.1-1 老橋全景(Ponte Vecchio)



圖 5.1-2 佛羅倫斯的阿諾(Arno)河岸

在本次考察中所到訪的英國倫敦市，泰晤士河流經市中心，沿河兩岸聚集了許多知名的建築物，成為倫敦國際都市形象與活動的重要場地，河上的橋梁自然也不例外均是重要的地標之一。本次參觀的英國倫敦塔橋(Tower Bridge)、亨格福德橋(Hungerford Bridge)暨步行橋五十週年紀念橋(Golden Jubilee Bridges)，與Paddington地區的渦捲橋(Rolling Bridge)分別說明橋梁設計如何在既有的都市紋理中與城市風貌有和諧的呼應，既突顯橋梁本身構造的美與特色，也強化了與當地環境的特徵。

(1) 倫敦塔橋(Tower Bridge)

此橋建於 1894 年通車(甲午戰爭那年)，為開啟式的鑄鐵公路橋，如圖 5.1-3 所示，雙橋墩在造型語彙上呼應了泰晤士河岸新文藝復興的傳統建築樣式，超過

百年風華的橋梁是最鮮明的倫敦城市形象代表之一。橋上設有博物館，開放遊客參觀其橋梁本身功能的相關展示與眺望，吸引每年數百萬人次到訪，成功的經營模式結合地點的優勢，突破了橋梁本身的功能，成功開拓了遊憩與文創的商機，可成為淡江大橋未來營運的借鑑。

(2) 亨格福德橋 (Hungerford Bridge) 暨步行橋五十週年紀念橋 (Golden Jubilee Bridges)

亨格福德橋建於 1864 年，但於 2002 年在其兩翼建造了步行橋五十週年紀念橋 (Golden Jubilee Bridges)，如圖 5.1-4 所示，由建築師 Lifschutz Davidson Sandilands 設計，榮獲 Lighting Design Award 2003，Westminster Society Award 2003，Royal Fine Arts Commission Award 2003，Waterfront Center USA Honor Award 2003 及 Civic Trust Award 2004 各項殊榮，在面對新與舊融合條件下，建築師採用的策略是讓笨重的舊鐵路橋居中，利用鋼構拉索的方式，興建兩側長達 300 公尺的人行橋，而新的傾斜支柱設計參考了 1951 年大英國協博覽會場結構樣式，不論是輕巧優雅的白色鋼纜，或是新結構支承與老橋搭接的處理，其設計均令人印象深刻。

(3) 捲橋(Rolling Bridge)

這座橋坐落於 Paddington 地區充滿現代感的新開發商業中心，為了運河上偶爾還有平底船出入而興建的可捲動式鋼構橋，如圖 5.1-5 所示，其說明創意橋梁在現代空間中發揮的藝術與科技感。本橋由 Heatherwick Studio 設計，發揮工藝與巧思並結合景觀規劃，已成為城市空間中的驚嘆號！



Tower Bridge Glass Floor

Experience our newest spectacular feature in the high-level Walkways!

See London life through a glass floor, from a unique viewpoint 42 metres above the River Thames. And if you're lucky, enjoy the magic of the bridge lifting below your feet!

[READ MORE](#)

Step Inside

What to expect when you step inside the most famous bridge in the world

From the modern high-level Walkways and its spectacular new glass floor to the historic Engine Rooms and Towers, Tower Bridge Exhibition tells the history of the bridge and why it came into existence through animations and digital displays.

[READ MORE](#)

TAKE THE Glass Floor Challenge!

Morning Mindfulness

Keep calm in the capital with Tower Bridge's one-off series of mindful movement sessions on its famous Glass Floor, 42 metres above the Thames.

[READ MORE](#)

with Towerworks Arts Festival launches an International Women's Day. Find out more about the female-only exhibition taking place in the Victorian Engine Rooms.

[READ MORE](#)

Engineering Tours

Discover the inner workings of the most famous bridge in the world with our renowned engineering tours.

Bookings now being taken for this season's Engineering Tours

[READ MORE](#)

圖片來源 <http://www.towerbridge.org.uk/whats-on/>

圖 5.1-3 倫敦塔橋(Tower Bridge)與博物館

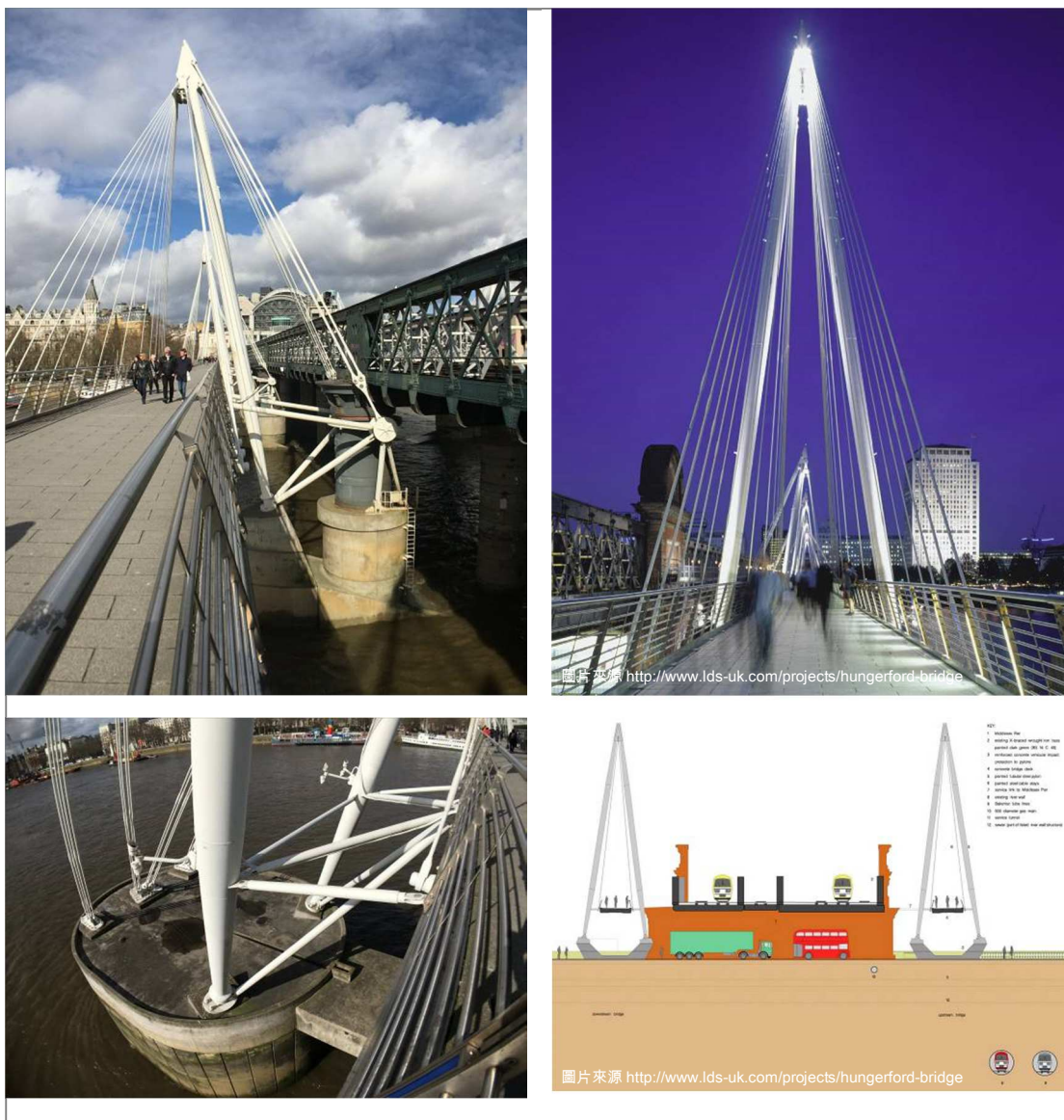


圖 5.1-4 亨格福德橋(Hungerford Bridge)暨步行橋五十週年紀念橋(Golden Jubilee Bridges)

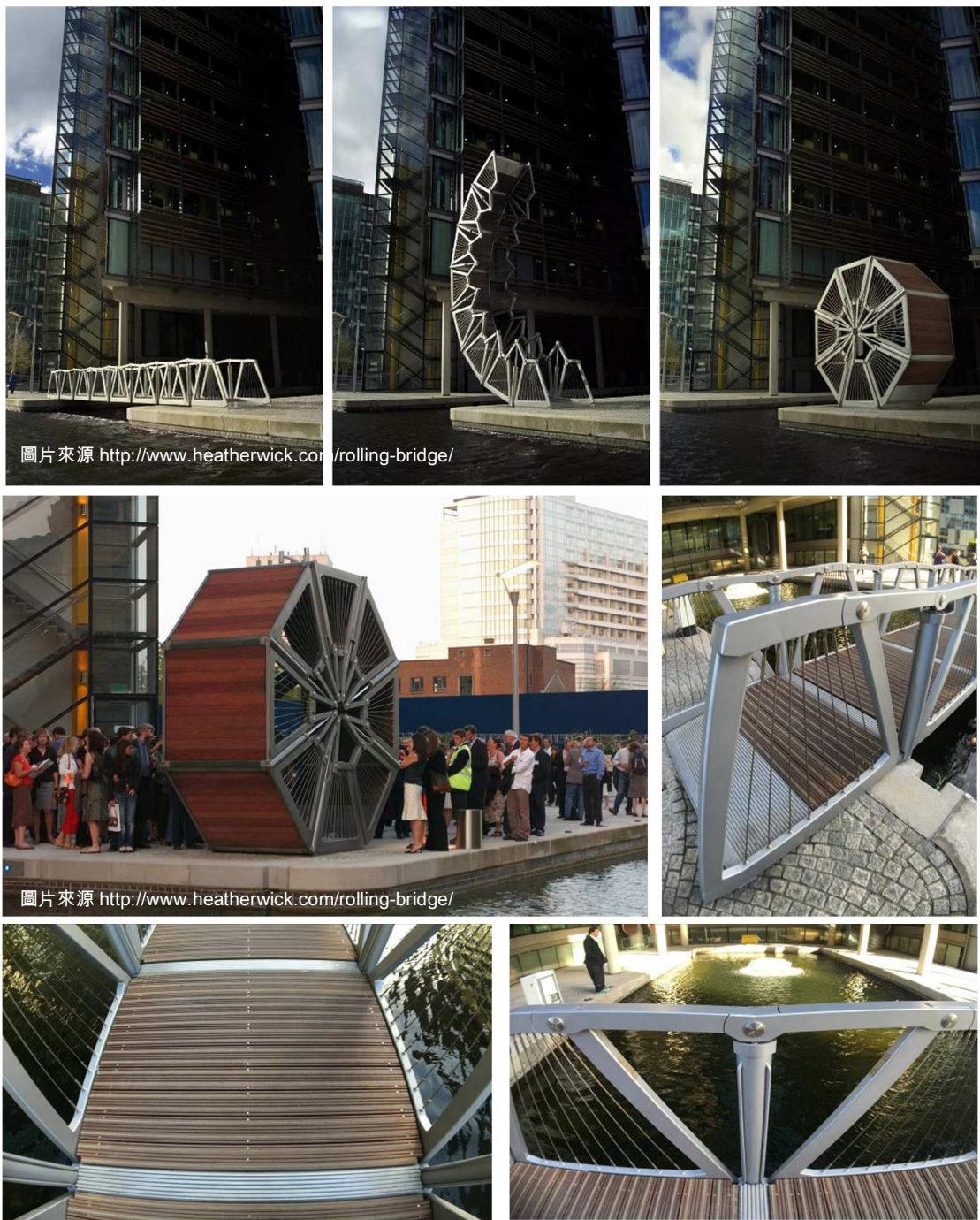


圖 5.1-5 渦捲橋(Rolling Bridge)操作過程與細部近照

2. 色彩與質感

橋梁形式與所在的環境，決定了它用色的原則。科學地說，色彩包含了色相、明度、彩度三個元素，除此之外，考量色彩量體與色彩心理學攸關的配色技巧也是重要的技巧。於是透過對橋梁構造與環境色彩的分析，可以幫助我們決定橋梁配色原則，是要再加強與環境的融合度或是創造對比戲劇性來發展。舉例說明橋梁色彩環境融合度高的瑞士蘭德瓦沙(landwasser)拱橋為例，如圖 5.2-1 所示，該橋已成為造訪瑞士高山搭乘景觀火車的重要景點之一，橋梁石拱的語彙與色彩，與周圍岩壁融為一體，讓每一次紅色鐵路車廂線性蜿蜒經過時，與四周山林的綠意短暫成為互補色，增加了這個橋梁空間偶一為之的戲劇性。相較於台灣山野總是以紅色來塗裝鋼構橋梁，雖然恆久醒目但是總是覺得色彩表現單調，缺乏更有層次的美感。



圖 5.2-1 列車穿越中的蘭德瓦沙拱橋(landwasser viaduct)

本次考察的橋梁中，我們參觀了荷蘭奈梅亨地區 Nijmegen Waal 河上的 De Oversteek 城市橋(De Oversteek City Bridge)，如圖 5.2-2~3 所示，荷蘭 Arnhem-Nijmegen 接辦 velo-city 2017 世界自行車大會，本橋將是大會活動自行車路線主要橋梁之一。此橋是 Ney Poulissen Architects & Engineers 所設計，採用主橋鋼構與引橋混凝土結構興建，特別是設計語彙的使用獨具特色，引橋橋身部分採波浪磚砌的風格設計，所以使橋身的色彩與質感與一般傳統橋梁的形象大異其趣，此橋四周是較為空曠的地區，有灰色磚造低矮的工廠，河岸地景呈現水平性的明

顯特徵，利用波浪型態產生雕塑感，來柔化引橋的巨大量體，也為當地景觀增加了一層結構質感，故水岸的特色與周邊都市建築立面的質感均可作為創意的來源。除立面質感外，許多細部設計也突顯這座橋梁的設計感，如橋底短柱的柱型幾何轉化，橋面板開口部設置鋼製樓梯，樓梯側板與預鑄混凝土踏階整合自行車牽引溝槽的整體設計，表現出荷蘭質樸簡約的設計特色。總之，不容易在一般橋梁構造上看到結構與色彩質感的整體搭配，可藉由這個案例看到未來可發展的方向。



圖片來源 <http://photo.zhulong.com/proj/detail128575.html>

圖 5.2-2 De Oversteek 城市橋

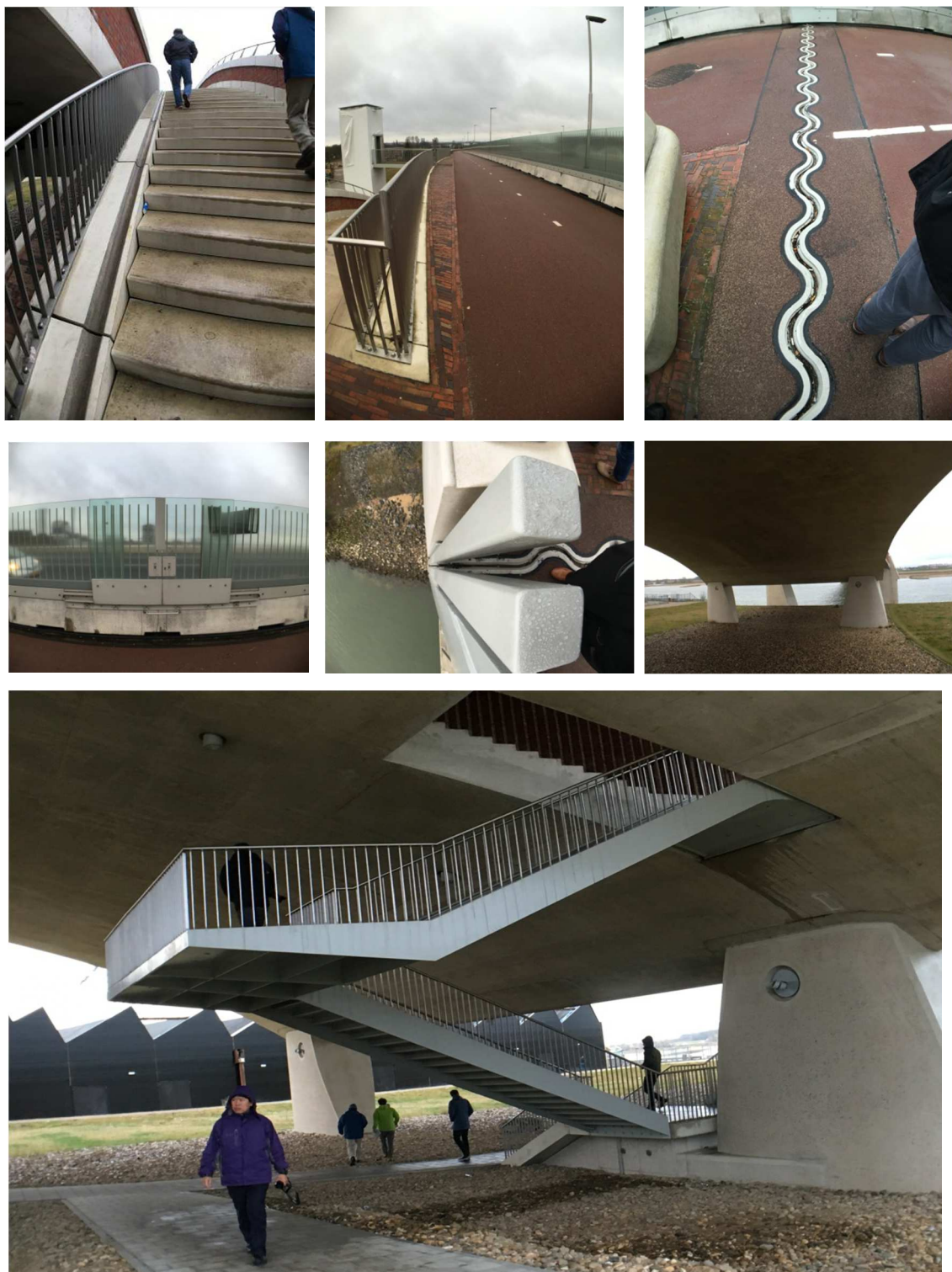
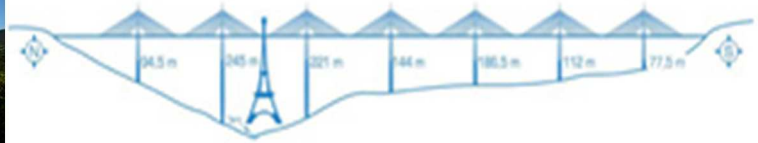


圖 5.2-3 De Oversteek 城市橋的細部近照

3. 結構比例

考量橋梁主要結構比例與四周環境的關係，會放大我們對橋梁之美的體驗，特別是現代橋梁設計，工程技術發展至更多長跨度、高橋墩的橋梁，結構比例讓觀賞者連帶地產生對技術的崇拜而更形成好感。這種工程技術的美感以法國米約高架為代表作，該橋是一座位於法國南部米約（Millau）附近的公路橋，最高橋塔頂點高於基座 343.0 公尺（1,125.3 英尺），是全世界結構高度最高的橋梁，如圖 5.3-1 所示。斜張橋設計穿越谷地，以淺白色系的橋身與天空為背景融合，高橋墩造型長方體平面旋轉至 90 度，表現造型的極簡美又富變化，不論近觀或是遠眺都可以體驗結構比例的特色。

在本次考察的 Trier Hochmosel 大橋便具備上述的結構比例的特色，如圖 5.3-2 所示。目前還在興建中的 B50 聯邦公路上跨河谷的公路橋，為目前德國境內最高的橋梁，與米約大橋的環境條件類似，也以橋梁輕輕跨越山谷的概念設計，橋身高 158 公尺跨越摩則爾河谷(Mosel Valley)，經過的是著名的葡萄酒產地，採用輕巧的結構與大跨距凌空而過，減輕交通所帶來污染與噪音，當我們站在河谷地面遠望橋梁，特別輕巧的比例讓人驚豔。為減輕從河谷方望向橋梁的景觀衝擊，橋柱側邊減少寬度，也有幾何上的透視收分的考量

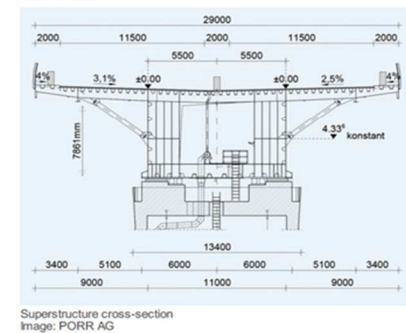
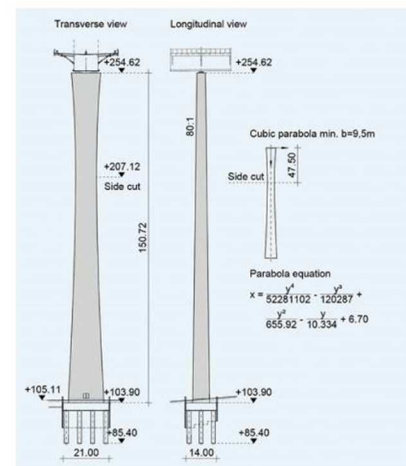


圖片參考自 <http://www.tourisme-aveyron.com/fr/decouvrir/incontournables/viaduc-millau.php>

圖 5.3-1 米約（Millau）公路橋



View of the automatic climbing form work
Image: Brückner



圖片參考自 <http://worldofporr.porr-group.com/uploads/pdf/NewConstructionoftheHochmoselBridge.pdf>

圖 5.3-2 Trier Hochmosel 公路橋

六、結論

訪問波鴻魯爾大學期間，風洞試驗團隊正進行橋面板與橋塔斷面試驗，以求其空氣動力參數。未來將再進行受迫振動試驗、自由振動試驗、與全橋氣動彈性模型試驗，並採用取得之空氣動力參數配合數值模擬，以瞭解淡江大橋之空氣動力特性，確保其安全性，試驗團隊於簡報時說明風洞試驗之詳細實施內容與風洞試驗服務實施計畫內容相同。

在德國期間，可觀察到輕軌大眾運輸系統在城市中極為普遍，且在主要幹道設有自行車道，因此，許多橋梁設計除考量汽車與行人需求外，亦包括輕軌列車與自行車需求，其功能設計與淡江大橋相同。同時，亦發現水運為德國之重要運輸方式，斜張橋可使橋梁具有較長跨度，因此斜張橋在德國普遍採用於跨河橋梁。

在英國期間，橋梁造型與功能極具特色，令人印象深刻。由倫敦千禧橋曾因振動過大而關閉進行修改之案例可知，風洞試驗係依據有限風況資訊，納入人為假設進行考量，然自然風況多變可能與設計假設或試驗室條件並不一致，但仍可透過後續改善獲得解決。因此，設計階段應盡可能模擬可能出現之風況，完工後之觀察或監測將扮演重要角色，可藉此及時發現問題進行改善。此外，由於受限於試驗室設備能力，許多狀況可能無法在試驗中進行模擬，但數值分析可模擬更多之假設情境，提供較全橋氣彈性試驗更多之資訊。

本次參訪著重於風洞試驗與橋梁景觀美學部分，雖亦參觀部分大跨徑拱橋及斜張橋之施工，亦頗有收穫，然因時間受限，大跨徑橋梁於河海中基礎之設計及施工未能排入行程。而淡江大橋施工在即且在淡水河中興建深基礎及橋塔，國內目前尚缺乏經驗，仍應參考國外成功之設計與施工案例。

另外，本團隊與所有設計單位面對面共同進行討論，彼此充分表達想法，並有效率的立即解決設計問題，且藉此會面增進彼此熟悉度，使未來之溝通更為順暢，更有助於未來工作之進展。