

歐雷松德大橋--全球最大的斜張橋

楊欣誠、吳威德 國立中興大學材料系

摘錄自：國家地理頻道



一、前言

歐雷松德大橋是全球最大的鋼斜張橋，它連接北歐丹麥及瑞典，使兩國經濟互惠，不僅打破許多世界紀錄、擴大歐洲版圖，更把鋼結構相關領域的技術開發運用到極致，這會是 20 世紀偉大工程之一，也會是人類科技重要的里程碑。

二、連接丹麥與瑞典的聯絡道

位於北半球的波羅的海(Baltic Sea)和大西洋北海(North Sea)，在北歐的歐雷松德海峽交會，是世界上交通最繁忙的海峽之一，海峽兩岸距離雖然僅僅 16 公里，但海上氣候卻十分惡劣，也隔開了丹麥(Denmark)和瑞典(Sweden)。這兩國都有互相需要的東西：丹麥的首都哥本哈根(Copenhagen)需要便宜點的住宅，而瑞典的馬爾摩(Malmö)則需要更多的工作機會，如果建造一條聯接道路，把這兩個城市連起來，即可使兩國形成一個經濟互惠的大都會區；而此聯接道也將成為世界最長的海峽聯接道，並將改變歐洲的地圖，這是個大膽的願景、艱鉅的挑戰、大無畏的計畫。



圖 1 歐雷松德海峽的衛星影像

西元 1991 年丹麥人和瑞典人開會協議蓋一個聯接道將兩國連起來，正式啟動這偉大艱鉅的建築工程。聯接道路工程設計第一個遇上的困難點，就是位於丹麥海岸線上的哥本哈根，有一個名為卡魯普(Karup)的國際機場，若是蓋一條具有高塔的橋梁，會阻礙機場附近的空中交通；但若是蓋一條矮橋，雖然不會影響空中交通，卻會阻礙船隻航行，影響海上交通。工程師轉而考慮在海底蓋一條連接兩岸的隧道，但是建構 16 公里長的海底隧道工程十分浩大，會比蓋橋梁費事且昂貴；工程師們想出了另外一個方案，就是以不會影響空中交通為主，在機場附近建構海底隧道，而瑞典沿岸沒有機場，就可以建構不影響海上交通的高塔橋梁，但如何在汪洋大海中結合橋樑和隧道，因此需要再蓋起一座人工島嶼，讓隧道從海底爬上陸地，才得以與瑞典這邊的橋梁接合。島嶼完工後，丹麥的國土會增加 130 萬平方公里。因此連結 16 公里寬的歐雷松德海峽兩岸聯接道，是由 4 公里的海底隧道，4 公里的人工島嶼，以及 8 公里的歐雷松德大橋所組成。

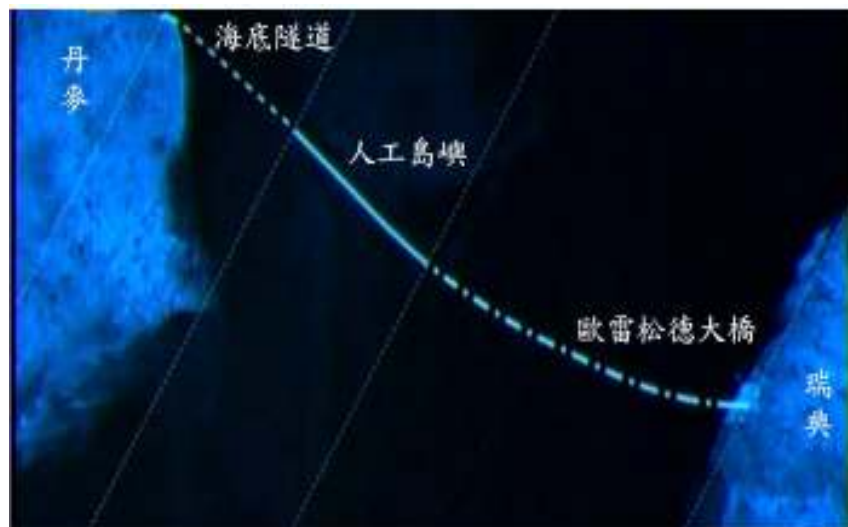


圖 2 歐雷松德聯絡道組成圖

三、橋梁設計

由於歐雷松德海峽的海上交通流量大，因此橋梁高度至少要高出海面 60 公尺，中間的跨度至少要 450 公尺以上，才能讓船隻順利通過，不妨礙海上交通。為了克服這項挑戰，蓋出符合要求的橋梁，兩國投資聯盟舉辦了橋梁投稿設計比賽，其中最精彩的設計企劃案是蓋一條全球最大的拱橋，但拱橋有它的致命傷，當拱橋橋墩傾斜向下插入海中，與橋下大型船隻的間距將會逐漸減少，船隻航行經過橋梁下，很有可能撞上拱橋橋墩的底部，造成整條橋崩塌(如下圖 7)。



圖 7 電腦模擬拱橋設計的致命傷

既然無法設計成拱橋，設計團隊考慮吊橋的可能性，吊橋所擁有跨距的，是所有橋梁種類當中最長的。在距離哥本哈根兩小時車程的地方，丹麥人建造了世界第二大的大貝爾特吊橋(丹麥語：Storebæltsbroen，也有音譯為斯托伯爾特橋)，它連接了西蘭島(丹麥語：Sjælland)與菲英島(丹麥文：Fyn)，跨度長達 2700 公尺，索塔高達 250 公尺，橋梁的結構主要是由索塔上懸掛的兩條主纜索支撐(如下圖 8)，這些巨大的纜索直徑將近 1 公尺厚，長度約 3 公里，主纜索其實是由一萬八千多條比鉛筆細的鋼索所構成，鋼索不是扭成一束，而是和旁邊的鋼索整齊排列連起來，結成一捆(如下圖 9 所示)，完成的纜索重量過 950 萬公斤，這只是一條的重量。



圖 8 索塔上支撐橋梁的兩條纜索



圖 9 構成吊橋的鋼索比拇指還細

興建吊橋的秘訣，在於錨定纜索的兩端。大貝爾橋的錨墩非常巨大，本身就是一座小島，每個錨墩重達 3 億公斤以上，但不能光是把纜索埋進混凝土裡，必須把負載向外分散，當纜索插入錨墩以後，將鋼索一束一束地越分越小，所有吊橋纜索埋進混凝土時，負載已經分散到 64 平方公尺的面積上(如圖 11 所示)。



圖 10 大貝爾橋的錨墩是座小島



圖 11 鋼索負載平均分配到 64 平方公尺的面積上

在橋墩裡，很容易看到纜索的柔性。使用鋼性不足的纜索連接纜索吊起橋，會讓橋梁變得很有柔性，橋身會在重量較大的地方向下彎曲，因此承載交通流量與重量都很大的火車，橋身就變得像是一座小山丘，火車會不斷的傾斜向上爬行，無法順利行駛。吊橋和拱橋的設計都遭排除，設計團隊轉而構思一個符合他們所有標準要求的設計，就是斜張橋，斜張橋橋梁的鋼性夠高，足以承受川流不息的汽車和火車所帶來的超大重量，因為支撐橋身的纜索，是直接繫在固定的索塔上，而且少了兩條巨大的主纜索，所以斜張橋比吊橋省了不少噸的鋼料(如圖 6)，因此符合歐雷松德大橋所以需求的最佳設計，就是一條高聳的雙層斜張橋，上層是四線道高速公路，底下是兩線道高速鐵路，這會是 16 公里的歐雷松德聯絡道中，最登峰造極的成就，將成為建築史上的里程碑。

四、歐雷松德大橋建構工程

歐雷松德大橋是全球最長的斜張橋、最高的自撐式雙支柱橋塔，由 160 根纜索懸著 1090 公尺的馬路和鐵軌，以承載汽車在加上火車的龐大重量；橋身高出海面 60 公尺，使大小船隻均能通過橋下；204 公尺的索塔，高度相當於 60 層樓的大廈，使歐雷松德大橋成為全球最高的水泥建築之一，要打造這麼高大的橋樑組件，是整個歐雷松德建築案中最大的挑戰。兩根巨大的塔索支柱，只有行車道下側的巨大橫梁連接，路面以上將完全不以橫梁連接，這可以使橋梁設計看起來較清爽，也是為了預防飛機撞上，而且少了路面上的橫梁，索塔的柔性會比較高，萬一發生飛機失誤撞上的意外情況，傳遞到橋梁其他部份的衝擊會比較少，橋梁平安無事的機會變高。



圖 12 兩根索塔只由行車到下的橫梁連接

1. 索塔基座

塔索基座首先要在乾燥的船塢凹地內製造，巨大的索塔基座，底部面積為 1500 平方公尺，淨重 1800 萬公斤，運送起來相當困難，塔基有 22 公尺高，但歐雷松德海峽水深只有 7.5 公尺，所以實心的塔基無法利用浮力漂浮，必須載運到海上，但是這麼重的東西，世界上沒有一艘船載的動，所以歐雷松德的工程師就自己動手造船，他們先用兩艘巨大的平底船銜接在塔基的兩端，當乾燥的船塢內注滿水，雙體船就能浮在水上航行，而且需要動用五艘大拖船，才能把這套神奇的結構拖進海峽，到了預計的橋梁線上，利用衛星定位系統引導，把雙體船上的塔基放下，擺進海床上挖好的坑洞裡，使塔基只突出海平面 3 公尺，在塔基上施工，索塔的兩根支柱以 4 公尺的組件疊加，使柱墩往上加高 180 公尺，而兩根支柱的進度須保持 12 公尺內的差距，才不會防礙巨大的起重機運作。



圖 13 巨大的索塔基座

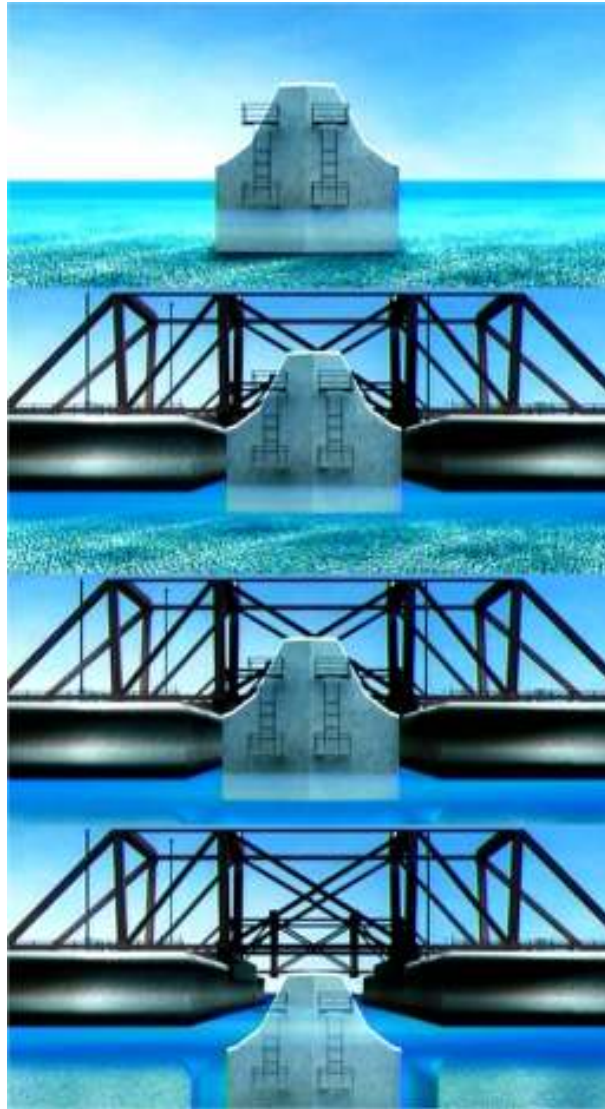


圖 14 索塔基座運送流程

當塔索高達 44 公尺時，就該加上橫梁了；到了 80 公尺高的時候，要把固定懸索的鋼箱安裝進支柱內，接下來每隔 12 公尺都要安裝鋼箱(如下圖 15 所示)，以固定纜索。索塔表面看起來是實心的，但其實內裝各種設備，包括一部電梯，可到達索塔頂端，方便維修人員維修檢測。



圖 15 安裝鋼箱以固定懸索

2. 鋼結構雙層橋跨距

當歐雷松德海峽中央正在建造索塔的同時，岸上同時進行組裝雙層橋的跨距組件，這些巨大的箱型鋼結構，大約長 140 公尺，寬 23 公尺，頂上是一條四線道公路，火車則在第二層裡面行駛，設計師把鐵軌鋪在特殊的水泥槽裡，萬一火車出軌，水泥襯底可避免火車不至於落橋。跨距的底部看起來是實心的，但就和索塔一樣，裡面是空心的，也容納了橋梁的關鍵設備：橋梁總共有 8 千萬公斤的鋼料，若是生鏽的話，會把橋梁從裡到外侵蝕毀滅殆盡，雖然油漆可以防鏽，但油漆這麼大的表面積會很浪費，所以在歐雷松德大橋裡面安裝龐大的除濕系統，讓內部空氣相對濕度低於 60%，以防止生鏽。



圖 16 雙層橋箱型鋼結構跨距的組裝及建造



圖 17 鐵軌鋪在水泥槽內，防止火車出軌時落海

歐雷松德大橋最後的工程，就是橋梁跨距組件的結合，所有的接合的規劃和計算，都要等主跨距就位才能繼續。橋面組件重量重達 550 萬公斤，必須吊高 60 公尺才得以接合，因此他們需要全球最大的水上起重機，這架起重機叫做天鵝，它必須將主跨距懸在索塔邊，待施工人員確實繫好索塔與橋樑組件間的纜索，才能懸吊下一塊組件，然後再繫纜索，連續這些步驟小心的組裝，並注意強風大雨所帶來的意外，而且當懸挑的組件離索塔越遠，組件接合時越橋梁脆弱，必須等到所有組件安裝完成後，橋梁才能完整發揮強度。



圖 18 天鵝起重機



圖 19 索塔與橋樑組件間的纜索安裝

五、全球最大鋼結構斜張橋歷史性的一刻

西元 1999 年 8 月 14 日，「天鵝」組裝好了行車道最後一段跨距，丹麥和瑞典初次連接起來，丹麥的斐德烈王子和瑞典的維多莉亞太子妃，在史上首次跨越邊界時會面；9 年來，完工期限的壓力籠罩一切，包括參與打造歐雷松德聯絡道的每個人，終於在 2000 年 7 月 1 日晚上 11 點，歐雷松德聯絡道正式啟用，不但，而且沒有超出預算，打造橋梁、隧道和島嶼，官方預計接近 30 億美元，都在兩國間的金融貿易往來所得到利益增加的情況下，慢慢回本。

從丹麥沿岸連接到瑞典沿岸打造一條固定聯絡道跨越 16 公里的歐雷松德海峽，是好幾代以來的夢想，這是一項龐大的工程，擁有全世界最大的沉管海底隧道，全球最長的可行駛汽車和火車的雙層鋼結構橋梁，全球最高的自撐式雙支柱橋塔，把科技潛能發揮到最極限，不僅改變了歐洲版圖，也成功地讓兩個城市、兩個國家和整個歐洲大陸變得更加緊密，成為全球最偉大的鋼結構橋梁之一。