

新北市政府 112 年度自行研究報告

特殊橋梁安全監測管理—以淡海輕軌 為例

研究機關：新北市政府捷運工程局

研究人員：李豐晏

研究期程：112 年 1 月 1 日至 112 年 12 月 31 日

新北市政府 112 年度自行研究成果摘要表

計畫名稱	特殊橋梁安全監測管理—以淡海輕軌為例
期程	112 年 1 月 1 日至 112 年 12 月 31 日
經費	無
緣起與目的	早期即建立完整適當的橋梁檢測制度與系統，除可減少日後維修成本，更能延長橋梁壽齡，目前國內現行橋梁檢測已有成熟、穩定且能符合實務執行之技術，然如何依橋梁特性、現地狀況及養護條件訂定完整適當之橋梁檢測制度與系統，實為各橋梁養護管理機關單位之重要課題。 本文介紹淡海輕軌運輸系統中「藍海橋」於營運時期應用之安全監測系統及維護計畫，透過於設計施工階段時，訂定橋梁營運檢測制度，經落實檢測頻率及工作，提早了解可能存在風險，立即研擬後續解決方案，才能達成橋梁永續維護之目的。
方法與過程	藍海橋營運監測標的為吊索索力值及主梁變位值，吊索索力值採用微振檢測法於每一束試驗吊索安裝振動感測器(加速度計或速度計)，以量測記錄吊索振動訊號；主梁變位值則於主梁吊索位置安裝結構物沉陷點，以水準儀量測各沉陷點之高程。 根據監測結果需確認索力值及沉陷量是否皆小於警戒值外，並索力值亦需與營運後初始值進行比較。如發現索力值與營運後初始值偏差超過 10%，橋體可能有異常情況，此時應針對整體橋梁結構進行全面目視檢查，並檢視吊索外觀是否已有明顯鏽蝕及損傷，另配合結構沉陷點檢測結果，確認橋梁高程是否有異常變化。

研究發現及建議	橋梁以微振檢測法測得之營運後吊索索力初始值，並詳細記載檢測過程中各項氣候條件，盡可能於相同氣候條件下，進行營運後吊索索力追蹤，以避免因溫度、風速等氣候條件不同，造成營運後吊索索力追蹤有誤判之可能。 藍海橋吊索索力安全管理標準值是以設計靜載重及活載重等外力作用下，所計算各吊索對應之最大設計索力作為標準值，警戒值係為標準值的 80%，較小於吊索有效斷面可承受之極限載重，後續可視營運後吊索索力追蹤結果進行適當之調整。
備註	

目錄

壹、 前言	6
貳、 研究目的與範圍	7
參、 藍海橋簡介與監測	8
一、 藍海橋簡介	8
二、 營運安全監測系統	9
肆、 營運期間檢測情形	19
一、 檢測結果	19
二、 索力產生應力及變化的原因統計分析	20
伍、 結論	21

圖目錄

圖 1 藍海橋	9
圖 2 藍海橋自行車道	9
圖 3 藍海橋監測儀器安裝位置	11
圖 4 首次量測感測器安裝位置	11
圖 5 首次量測作業流程	12
圖 6 追蹤量測感測器安裝位置	13
圖 7 追蹤量測作業流程	13
圖 8 吊索索力調整示意圖	17

表目錄

表 1 藍海橋吊索檢測頻率	14
表 2 吊索索力安全管理標	15
表 3 主梁變位安全管理標	16

壹、前言

為兼顧交通功能與景觀意象，近年來國內橋梁設計紛紛著重以景觀導向之特殊性橋梁，鑒於國內早行橋梁相關檢測規範未能適用於特殊性橋梁結構物，交通部於 109 年 1 月 3 日頒布公路橋梁檢測及補強規範修訂作業[1]，其中修正規範一般說明，對於特殊性橋梁，公路養護管理機關、公路養護單位應另訂定維護管理作業計畫。本文介紹之藍海橋為鐵路橋梁型式，除需遵照鐵路橋梁檢測及補強規範執行外，亦需遵循公路橋梁檢測及補強規範之相關規定辦理。

依過往研究顯示，早期即建立完整適當的橋梁檢測制度與系統，除可減少日後維修成本，更能延長橋梁壽齡，目前國內現行橋梁檢測已有成熟、穩定且能符合實務執行之技術，然如何依橋梁特性、現地狀況及養護條件訂定完整適當之橋梁檢測制度與系統，則為各橋梁養護管理機關單位之重要課題。

本文即介紹淡海輕軌運輸系統中「藍海橋」於營運時期應用之安全監測系統及維護計畫，透過於設計施工階段時，訂定橋梁營運檢測制度，經落實檢測頻率及工作，提早了解可能存在風險，立即研擬後續解決方案，才能達成橋梁永續維護之目的。

貳、 研究目的與範圍

藍海橋為淡海輕軌運輸系統橫跨淡水公司田溪出海口之重要橋梁，其吊索系統屬特殊性橋梁結構，營運時期除至少每年對橋梁及吊索結構整體外觀進行基本檢查外，並應用安全監測系統來定期評估橋梁健康狀態。本文主要介紹藍海橋特殊性橋梁結構之橋梁安全管理制度；內文中說明藍海橋是以吊索微振檢測法及主梁結構沉陷點，定期追蹤吊索索力變化及主梁變位情形，並依據設計載重訂定安全管理值標準，若於營運後長期追蹤發現監測數值有異常情況，則須採取之異常應變處理，以確保橋梁整體安全性。

參、 藍海橋簡介與監測

一、 藍海橋簡介

淡海輕軌運輸系統藍海線為保護清法戰爭滬尾古戰場城岸遺跡，打造橫跨淡水公司田溪出海口的「藍海橋」，橋梁單側設有自行車道，串連溪旁原有自行車道，形成完整自行車道路網，夜間照明設計輔以光雕投影，使藍海橋成為淡水地區新興景點。

藍海橋設計型式為雙拱單跨下路式鋼拱橋(別稱提籃式鋼拱橋)，主梁與上方兩拱肋以吊索組成(如圖 1)，橋梁全長為 120.7 m，拱肋中心高度為 25 m，橋面寬為 14.4 m，吊索規格為 15.2mm ϕ -19 股，採拱肋往主梁傾斜佈置，兩拱面各配置有 11 束吊索(共計 22 束吊索)，以懸吊主梁及橋面載重。自行車道總寬為 3.5m，以托梁型式附掛於單側主梁(如圖 2)。

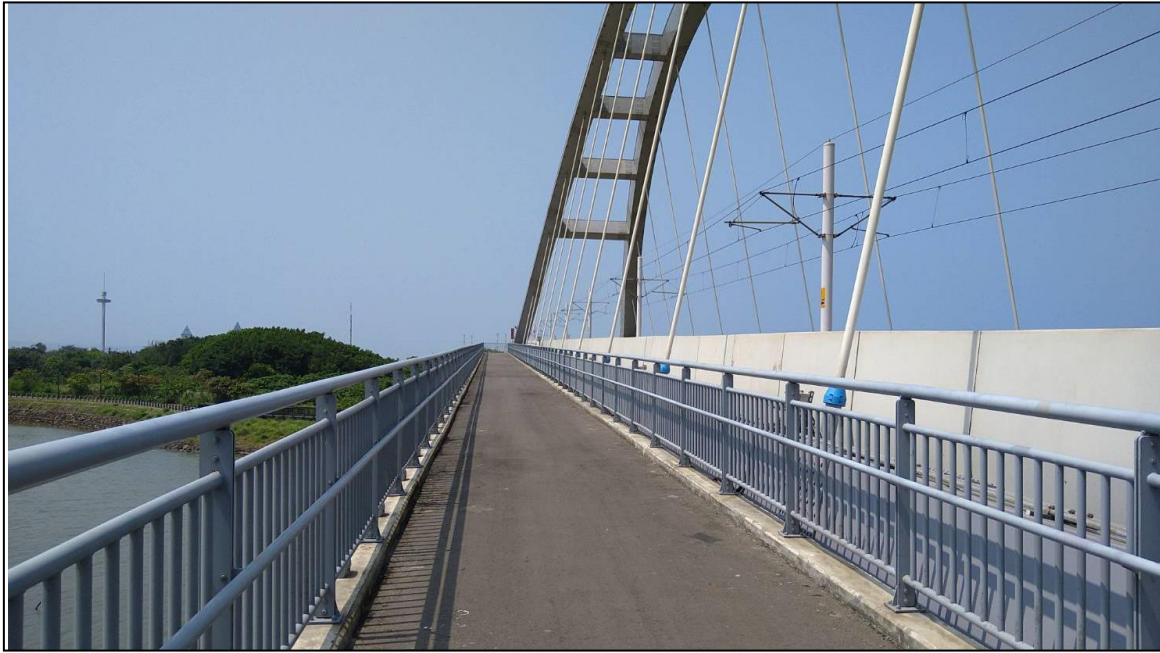


圖 1 藍海橋



圖 2 藍海橋自行車道

二、 營運安全監測系統

國內早行橋梁檢測規範係著重於一般性橋梁之檢測及補強，然藍海橋吊索系統屬特殊性橋梁結構物，為確保營運時期橋梁整體安全性，藍海橋透過營運安全監測系統，定期追蹤吊索索力變化及主梁變位情形，並由設計施工單位及營運管理單位共同訂定橋梁營運檢測制度，本節就藍海橋之監測標的、檢測方式、檢測頻率、安全管理值標準及異常應變處理，5大要點作逐一說明。

1. 監測標的

藍海橋營運監測標的為吊索索力值及主梁變位值，吊索索力值採用微振檢測法於每一束試驗吊索安裝振動感測器(加速度計或速度計)，以量測記錄吊索振動訊號；主梁變位值則於主梁吊索位置安裝結構物沉陷點，以水準儀量測各沉陷點之高程；藍海橋監測儀器安裝位置如圖 3。

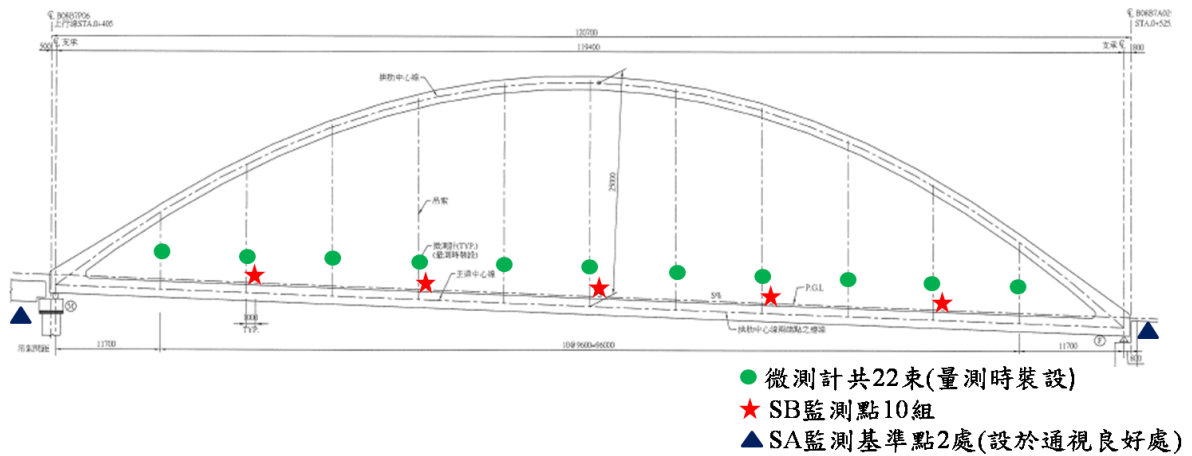


圖 3 藍海橋監測儀器安裝位置

2. 檢測方式

微振檢測法於營運前首次量測是以 5 個振動感測器(加速度計或速度計)裝設於單束試驗吊索，各感測器裝設位置起始於吊索底部防水罩口，於 2m 高度裝設第 1 個感測器，其後 4 個感測器依等間距 0.5M 安裝(如圖 4)。

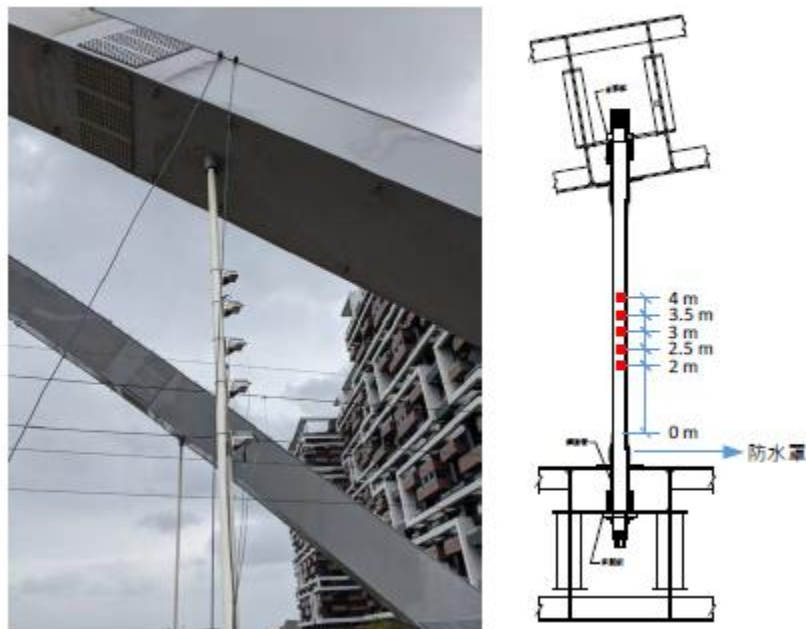


圖 4 首次量測感測器安裝位置

感測器安裝完成後，輸入量測訊號進行取樣，連續 10~15 分鐘同步紀錄 5 個感測器的振動訊號，完成後拆除感測器，蒐集到之振動訊號再進行吊索振動模態分析，利用模態振型及模態頻率訂定吊索有效振動長度及計算索力值，所採用之分析原理為「等效簡支梁法」，微振檢測法首次量測作業流程如圖 5。

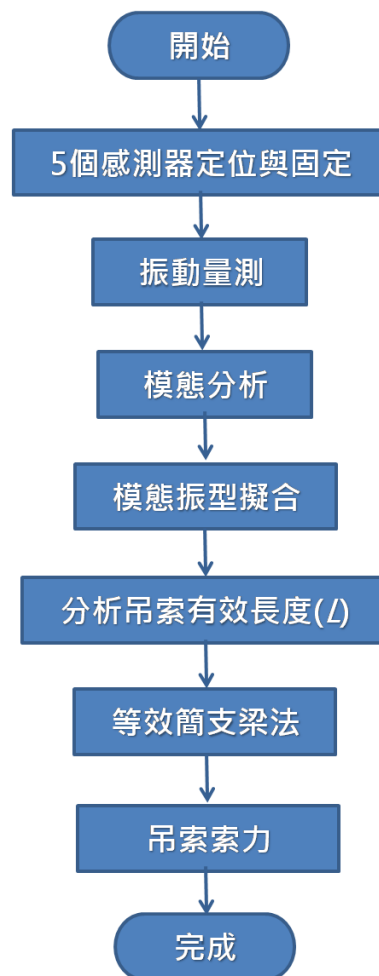


圖 5 首次量測作業流程

微振檢測法於營運後追蹤量測則於單束試驗吊索裝設 1 個振動感測器，裝設位置起始於吊索底部防水罩口 1.5M 高度（如圖 6）。



圖 6 追蹤量測感測器安裝位置

感測器安裝完成後，輸入量測訊號進行取樣，連續 10~15 分鐘紀錄感測器的振動訊號，完成後拆除感測器，利用蒐集到之振動訊號及營運前首次量測訂定之吊索有效振動長度，即可計算吊索索力值，微振檢測法追蹤量測作業流程如圖 7。

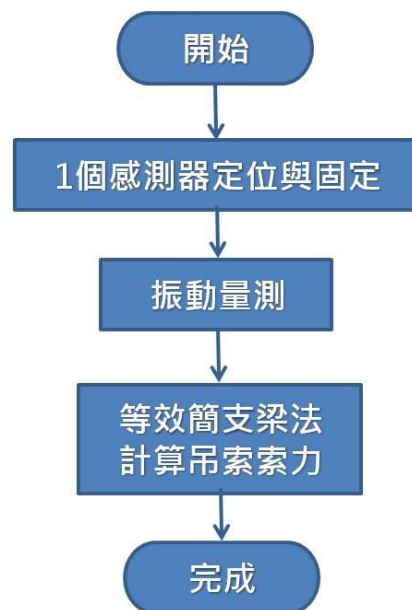


圖 7 追蹤量測作業流程

3. 檢測頻率

藍海橋位於淡水公司田溪出海口，吊索結構易受到強風及鹽分侵襲，除至少每 1 年進行吊索結構目視檢查外，針對吊索索力則於營運前進行首次量測，取得吊索有效振動長度，並於營運後 6 個月內進行索力初始值量測，後續則至少每 2.5 年進行索力量測追蹤，並將索力追蹤結果與營運後索力初始值進行比較，另結構沉陷點為每 1.5 年檢測高程，檢測結果與完工時之初始高程相較下，即可得知主梁變位情形，藍海橋檢測頻率規定如表 1。

表 1 藍海橋吊索檢測頻率

吊 索結構	吊索索力值量測	結構沉陷點 檢測
目 視檢查每 年 1 次	(1)營運前量測 1 次取得吊索有效振動長度。 (2)營運後 6 個月內量測索力初始值。 (3)爾後至少每 2.5 年進行索力追蹤。	(1)完工後檢測 1 次初始高程。 (2)營運後至少每 1.5 年檢測 1 次高程。

4. 安全管理值標準

藍海橋吊索為橋梁整體系統重要構件，在橋體產生異常時，會直接反應在各吊索的索力分佈狀態，為確保能在吊索裂損前即時應變處理，吊索索力安全管理值是以設計靜載重及活載重等外力作用下，所計算各吊索對應之最大設計索力作為標準值(如表 2)，而非以吊索斷面性質可承受之最大拉力值作為標準值；主梁變位安全管理值則是僅以設計靜載重作用下，所計算各結構沉陷點對應之最大設計變位作為標準值(如表 3)。

表 2 吊索索力安全管理標準

吊索編號	自行車道側										
	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6	RC7	RC8	RC9	RC10	RC11
設計最大值 (噸)	169.7	209.1	222.3	222.6	222.6	222.9	221.3	219.0	218.1	206.2	167.1
警戒值 (噸)	135.8	167.3	177.8	178.9	178.1	178.3	177.0	175.2	174.5	165.0	133.7
行動值 (噸)	161.2	198.6	211.2	212.4	211.5	211.8	210.2	208.1	207.2	195.9	158.7
吊索編號	非自行車道側										
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	LC8	LC9	LC10	LC11
設計最大值 (噸)	126.5	152.4	161.3	165.1	166.6	166.8	166.7	165.1	161.4	152.9	127.2
警戒值 (噸)	101.2	121.9	129.0	132.1	133.3	133.4	133.4	132.1	129.1	122.3	101.8
行動值 (噸)	120.2	144.8	153.2	156.8	158.3	158.5	158.4	156.8	153.3	145.3	120.8

表 3 主梁變位安全管理標準

設計考量										
項目	自行車道側					非自行車道側				
	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9	SB10
設計最大變位 (mm)	100.8	138.4	147.3	138.4	136.2	69.4	99.6	106.8	99.6	69.4
警戒值之變位 (mm)	80.6	110.7	117.8	108.9	77.1	55.5	79.7	85.4	79.7	55.5
行動值之變位 (mm)	95.7	131.4	139.9	129.3	91.5	65.9	94.6	101.5	94.6	65.9
營運階段考量										
項目	自行車道側					非自行車道側				
	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9	SB10
A.初始量測值	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
B.後續量測值	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
C=B-A 差異變位警戒 值(mm)	80.6	110.7	117.8	108.9	77.1	55.5	79.7	85.4	79.7	55.5
D=B-A 差異變位行動 值(mm)	95.7	131.4	139.9	129.3	81.5	65.9	94.6	101.5	94.6	65.9

備註：初始量測值為完工後營運前所量測之高程。

5. 異常應變處理

根據監測結果除需確認索力值及沉陷量是否皆小於警戒值外，索力值亦需與營運後初始值進行比較，如發現索力值與營運後初始值偏差超過 10%，可能意謂橋體有異常情況，除須排除為檢測氣候條件不同所造成之誤差外，此時應針對整體橋梁結構進行全面目視檢查，並檢視吊索外觀是否已有明顯鏽蝕及損傷，另配合結構沉陷點檢測結果，確認橋梁高程是否有異常變化，以研判吊索是否有進行索力調整或吊索更新之必要。

若經研判吊索有進行索力調整之必要，橋梁管理單位應委託有實例安裝吊索經驗之施工廠商，於施作前提送施工計畫、吊索監測計畫，內容需有詳細之結構分析計算，並擬定各吊索施拉之先後順序及施拉單束吊索索力預設值，以避免單束吊索力量於釋放及施加過程中，造成各吊索力量重新分配所造成之非預期性影響。索力調整方式可於吊索下端錨頭安裝鋼棒續接器及續接鋼棒，安裝完成後以千斤頂對錨頭施拉(如圖 8)，直至施拉索力達預設值後將固定螺母鎖緊，即完成單束吊索索力調整作業。

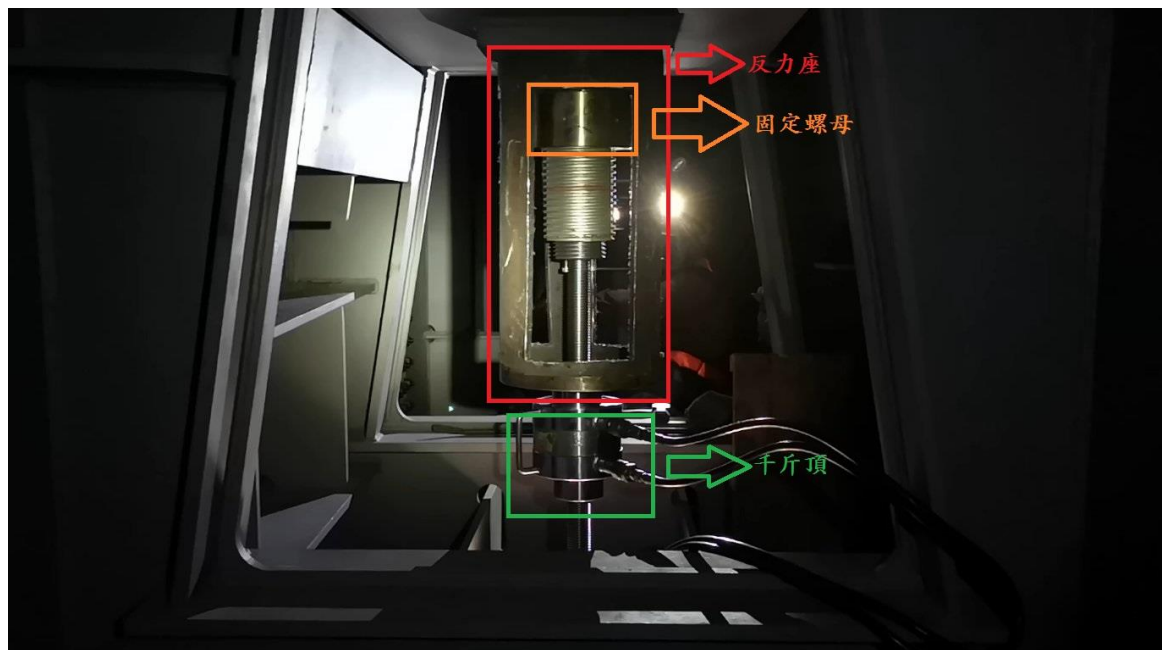


圖 8 吊索索力調整示意圖

若監測結果發現有吊索索力值已達警戒值，可能代表鄰近吊索因鏽蝕或其它損傷造成吊索有效截面積不足，當單束

吊索有效強度降低時，力量將重新分配使其它吊索受力超出預期，為避免吊索長期承受過大拉力之情況，此時則應進行吊索更新。目前國內已有台 15 線關渡大橋吊索更換之實例，然吊索更新不單僅靠工程技術去解決，還需經由詳細的結構分析計算，以減少更新過程中對原有構件之影響，橋梁管理單位應委託有實例安裝吊索經驗之施工廠商，於施作前提送施工計畫、吊索監測計畫、材料送審計畫等，內容需有詳細之結構分析計算，並邀請相關學者及專家審查核可後方得施工。

肆、營運期間檢測情形

淡海輕軌藍海線鋼索型式橋梁為 109 年 11 月 15 日通車啟用，目前完成第 4 次鋼索索力檢測，分別為施工階段、工程竣工索力初值量測、營運後 6 個月之活載重作用下索力量測及本次定期量測(詳表 2)，前後差異可見載重分布尚屬微變化，仍持續觀察，由新北捷運公司持續觀察及維護作業。本年度委託結構技師，針對橋梁平衡穩定性認證，避免持續起伏影響軌道、電力線系統線型率，以安全性為最大考量。現況由檢測單位台灣永續環境工程技術顧問有限公司認定尚屬安全。

一、歷次檢測數據

檢測歷程		施工階段(1)	完工後營運前(2)	營運後初始值(3)	營運中第一次檢測(4)
檢測方式		直接量測法	微振檢測法	微振檢測法	微振檢測法
檢測完成日期		109 年 7 月 13 日	109 年 11 月 4 日	110 年 3 月 12 日	111 年 6 月 29 日
吊索位置	吊索編號	索力值 (1) (tonf)	(2) 索力值 (tonf)	(3) 索力值 (tonf)	(4) 索力值 (tonf)
自行車道側	RC1	92.3	65.1	78.3	65.974
	RC2	112.43	101.0	115.2	102.190
	RC3	116.7	124.6	136.5	137.460
	RC4	118.9	126.6	128.8	122.610
	RC5	123.3	119.4	129.5	102.130
	RC6	130	114.5	126.8	104.270
	RC7	118.9	117.2	123.4	117.730
	RC8	118.9	122.4	132.2	134.840
	RC9	125	108.9	118.8	112.650
	RC10	114.5	97.3	104.6	85.910
	RC11	92.3	52.9	70.2	87.263
非自行車道側	LC1	65.8	47.8	59.9	75.237
	LC2	85.5	90.9	105.8	99.289
	LC3	97.6	81.2	89.5	116.099

	LC4	94.6	87.5	95.4	97.032
	LC5	96.5	96.5	90.1	80.888
	LC6	94.3	96.4	103.3	80.046
	LC7	94.3	84.5	89.4	90.427
	LC8	98.7	96.1	104.7	99.314
	LC9	96.5	95.1	102.3	80.093
	LC10	91	87.3	100.0	90.360
	LC11	72.4	53.3	72.1	72.133

二、索力產生應力及變化的原因統計分析

1. 橋梁自體重量

2. 列車重量

3. 氣候的影響(溫度、濕度、風力)

4. 鋼索剛性疲乏(一般來說鋼索至少有 8 年以上使用壽命)

伍、 結論

- 一、橋梁應依其特性、現地狀況及養護條件訂定完整適當之橋梁檢測制度與系統，並仰賴橋梁管理單位按照營運檢測制度落實執行，才能達到橋梁永續維護之目的。
- 二、微振檢測法測得之振動訊號需確認為正確的吊索振動，而不是只有吊索外部套管振動；另吊索需有足夠的長度，過短的吊索分析得之索力誤差相對較大。
- 三、橋梁以微振檢測法測得之營運後吊索索力初始值，並詳細記載檢測過程中各項氣候條件，盡可能於相同氣候條件下，進行營運後吊索索力追蹤，以避免因溫度、風速等氣候條件不同，造成營運後吊索索力追蹤有誤判之可能。
- 四、藍海橋吊索索力安全管理標準值是以設計靜載重及活載重等外力作用下，所計算各吊索對應之最大設計索力作為標準值，警戒值係為標準值的 80%，較小於吊索有效斷面可承受之極限載重，後續可視營運後吊索索力追蹤結果進行適當之調整。

參考文獻

1. 交通部 109 年 1 月 3 日頒布公路橋梁檢測及補強規範。
2. 新北大眾捷運股份有限公司 111 年度大眾捷運系統橋梁檢測及維修情形摘要報告(2 版)。