

# 橋梁安全監測系統介紹

## — 以美谷義橋為例

黃進國／中興工程顧問股份有限公司結構工程部工程師

葉啟章／中興工程顧問股份有限公司結構工程部計畫主任

王正中／中興工程顧問股份有限公司結構工程部技術經理

鄭書恒／中興工程顧問股份有限公司結構工程部部門經理

邱毅宗／國立臺北科技大學土木工程系博士生

黃秋揚／交通部公路總局第五區養護工程處阿里山工務段段長

陳嘉盈／交通部公路總局第五區養護工程處處長

### 摘要

橋梁扮演著兩地文化交流、經濟貿易、交通運輸的重要角色，一旦橋梁發生倒塌事故，常常造成無法估計的人民資產及社會經濟嚴重損失。本文採用數值模擬搭配即時監測系統進行橋梁安全狀態評估，系統上規劃了吊索振動加速度（索力）、橋台傾斜角監測以及即時 CCTV 影像監視，藉此確保用路人的安全。

### ABSTRACT

Bridge plays the important roles between two regions for cultural exchange, economy, trade and transportation. In case bridge crash, it caused serious loss on people's properties and social economy. In this paper, it used numerical simulation with real-time monitoring system to evaluate bridge safety condition. The planned system including accelerometers to monitor cable vibration frequencies (thus cable forces), inclinometers to monitor, inclination of abutment, and CCTV images. Base on these to make sure safety of road users.

### 前言

受到氣候劇烈變化的影響，台灣的公共工程所受到的環境影響越趨於嚴苛，近年來常常發生颱風豪雨

侵襲，導致山區發生邊坡崩塌、土石流侵蝕、洪水沖刷等，導致橋梁破壞，因此橋址的選擇便顯得相當重要，本文橋梁所在橋址於 2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風發生時，山坡地受到暴雨的侵襲，產生了嚴重的道路邊坡大規模坍滑，導致原有道路通行中斷，然而此路段邊坡陡峭，局部路段的腹地不足，難以採用路工方案復建，故交通部公路總局在該橋址附近規劃了一座長跨徑的鋼拱橋直接跨越侵蝕溝，避開邊坡崩坍區（如圖 1 所示），藉此消除用路人通行時受到零星落石的威脅。本文中橋梁為半穿式鋼拱橋，全長 198 m，拱高 32 m，路面寬 10 m（淨寬 9 m），橋跨跨距分別為 14 m-170 m-14 m，兩側各配置 18 根斜吊索<sup>[1-3]</sup>。本文中的鋼拱式橋梁，其橋面版、橋護欄、路面 AC 及車流的重量主要透過斜吊索傳遞到鋼拱梁，再傳遞至兩側拱圈下側的基礎，由此顯示斜吊索在本橋扮演著相當重要的力量傳遞角色，參考前人研究成果<sup>[4-10]</sup>，規劃了橋梁安全監測系統，監測內容包括斜吊索振動加速度（索力）監測、橋台傾斜角監測、CCTV 即時影像監視，透過監測系統即時掌控橋梁吊索振動加速度（索力）變化、橋台傾斜角變化，並搭配數值分析程式之模擬，瞭解橋梁的健康狀況，來達到確保用路人行車安全的目的。



圖 1 台 18 線芙谷峩橋現況

### 數值模型

為瞭解該橋梁結構系統整體特性及吊索振動特性，本文採用商用套裝數值模擬軟體建構出該橋梁之數值模型，如圖 2 所示，該橋梁之平、立面圖，如圖 3、圖 4 所示。該橋全長 198 m，拱高 32 m，路面寬 10 m（淨寬 9 m），橋跨跨距為 A1-P1-P2-A2（14 m-170 m-14 m），兩側各配置 18 根斜吊索，透過數值模擬挑選出橋梁兩側各 6 根斜吊索進行監測。單根吊索採用 13 股高拉力 7 線鋼絞索（ $\phi 15.2$  mm），單絞索內部灌注油脂（Grease），

外面包覆 HDPE 套管，13 股單絞索外層再包覆 HDPE 套管，單根鋼纜斷面積為 1803.1 mm<sup>2</sup>，極限抗拉強度為 345.8 tf，吊索構造如圖 5 所示。考量橋梁相關尺寸及材料參數，預先模擬得到監測吊索的局部模態（如圖 6 所示），再於模型中以調整吊索索力的方式，採二次式關係式（ $T = a \times f_1^2 + b \times f_1 + c$ ）描述第一階模態頻率（ $f_1$ ）與索力（ $T$ ）之關係，如表 1、表 2 所示，建構出吊索第一階模態頻率（ $f_1$ ）與索力（ $T$ ）關係圖，如圖 7、圖 8 所示。

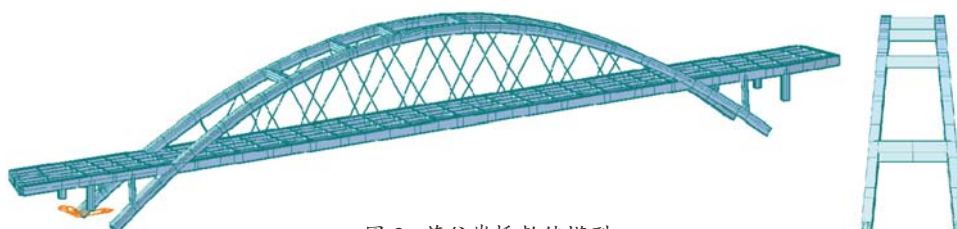


圖 2 芙谷峩橋數值模型

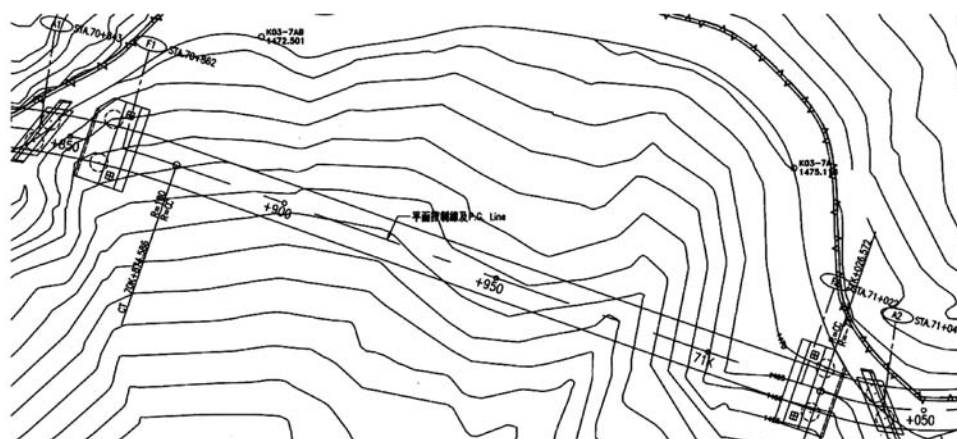


圖 3 芙谷峩橋平面圖

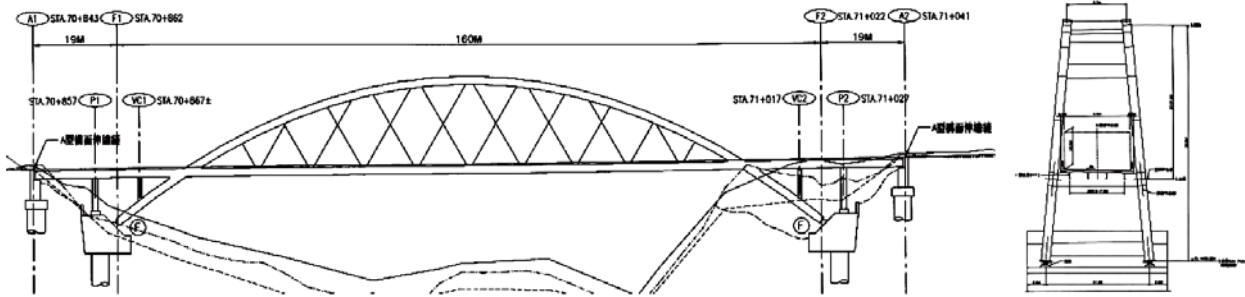


圖 4 芙谷峽橋立面圖

圖 7 下游側吊索第一階模態頻率 ( $f_1$ ) 與索力 ( $T$ ) 關係圖

吊索編號	索長 (m)	a	b	C	R - Square
R03	13.308	979.57	-321.54	969.8	1
R08	23.530	2849.3	549.35	-954.42	1
R09	22.641	3092.4	296.22	-296.61	0.9999
R10	22.641	3130.3	-108.91	365.83	1
R11	23.225	2907.1	75.449	-31.958	0.9999
R16	12.510	961.87	-157.61	364.46	1

圖 8 上游側吊索第一階模態頻率 ( $f_1$ ) 與索力 ( $T$ ) 關係圖

吊索編號	索長 (m)	a	b	C	R - Square
L03	13.308	959.01	-40.171	47.097	1
L08	23.530	2855.1	551.5	-1057.8	0.9999
L09	22.641	3086.2	315.46	-277.18	1
L10	22.641	3099.1	179.36	-237.42	1
L11	23.225	2827.9	691	-1196.9	1
L16	12.510	955.66	-79.734	133.1	1

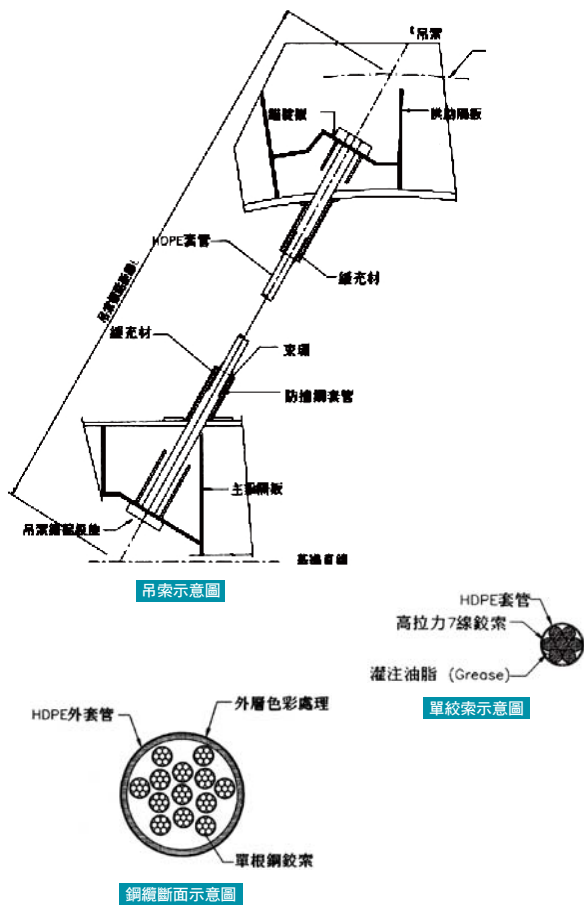


圖 5 吊索構造示意圖

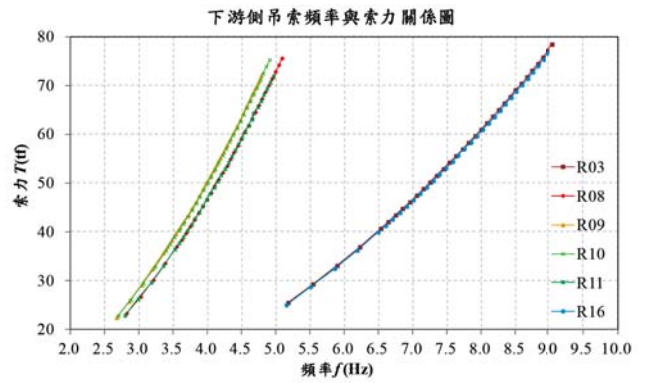


表 1 下游側吊索第一階模態頻率 ( $f_1$ ) 與索力 ( $T$ ) 回歸公式係數表

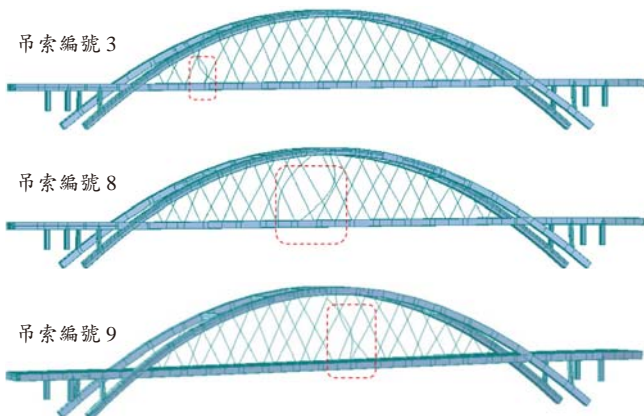


圖 6 吊索局部振動模態

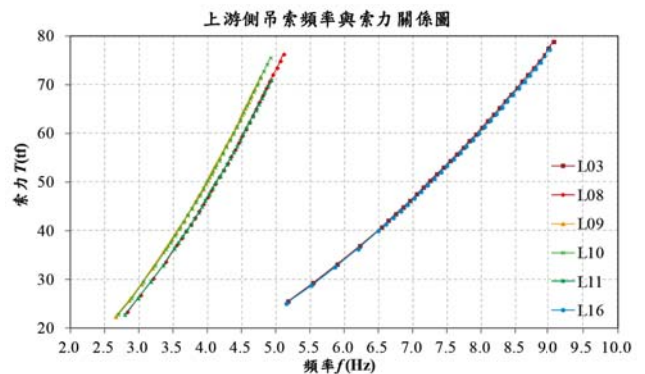


表 2 上游側吊索第一階模態頻率 ( $f_1$ ) 與索力 ( $T$ ) 回歸公式係數表



## 橋梁安全監測系統規劃

本橋梁規劃之監測系統包含：(1) 單軸向加速度計（量測範圍： $\pm 2\text{ g}$ ，靈敏度： $5\text{ mV/Gal}$ ）、(2) 雙軸向傾斜計（量測範圍： $\pm 15$ 度，解析度： $10$ 秒）、(3) 攝影機、(4) 動態資料擷取器（取樣率： $2000\text{ samples/sec (max)/ch}$ ，頻道數： $8\text{ ch/台}$ ）、監測主機、(5) 監測網頁展示平台，各儀器設備安裝位置如圖 9 所示，廠牌、型號、數量、安裝位置及用途如表 3 所述。整體監測系統包含四大區塊。包含現地監控系統（含資料分析處理）、監控中心平台、遠端監控系統、警訊發佈及緊急處理作業，如圖 10 所示。現地監控系統（含資料分析處理）主要為安裝感測器於橋梁結構上，藉此擷取結構靜、動態行為訊號、並由監測主機即時分析處理擷取所得的訊號；再透過無線網路將分析結果傳輸至雲端展示平台，即時展示各感測器監測訊號分析結果，並於結構發生異常時，透過警訊發佈及緊急處理作業發送簡訊或電子郵件至相關權責管理單位，提供管理者行動判斷依

據。遠端監控系統可以讓使用者於遠端透過無線網路，使用電腦、智慧型手機登入監測網頁平台（如圖 11 所示），即時查看監測橋梁現況。

## 橋梁安全監測系統安裝

依據規劃之監測儀器安裝位置進行管線配置（包含電線、訊號線）、感測器（加速度計、傾斜計、攝影機）、監測箱（內部放置資料擷取器、監測主機、通訊模組）等之安裝，安裝照片如圖 12 所示。於儀器安裝前須先佈設交通維持設施及人工旗手（如圖 12a），以確保車流通行順暢及施工人員安全。由於加速度計安裝須透過舉高車在高空中作業，所以需先將加速度計組裝於保護盒內（如圖 12b），同時可先進行線路配置（如圖 12c），待加速度計保護盒組裝完成後，再使用舉高車將施工人員抬升至加速度計安裝高度，將加速度計連同保護盒牢固的安裝於吊索上（如圖 12d）。傾斜計安裝在橋台台身處（如圖 12e），攝影機安裝於

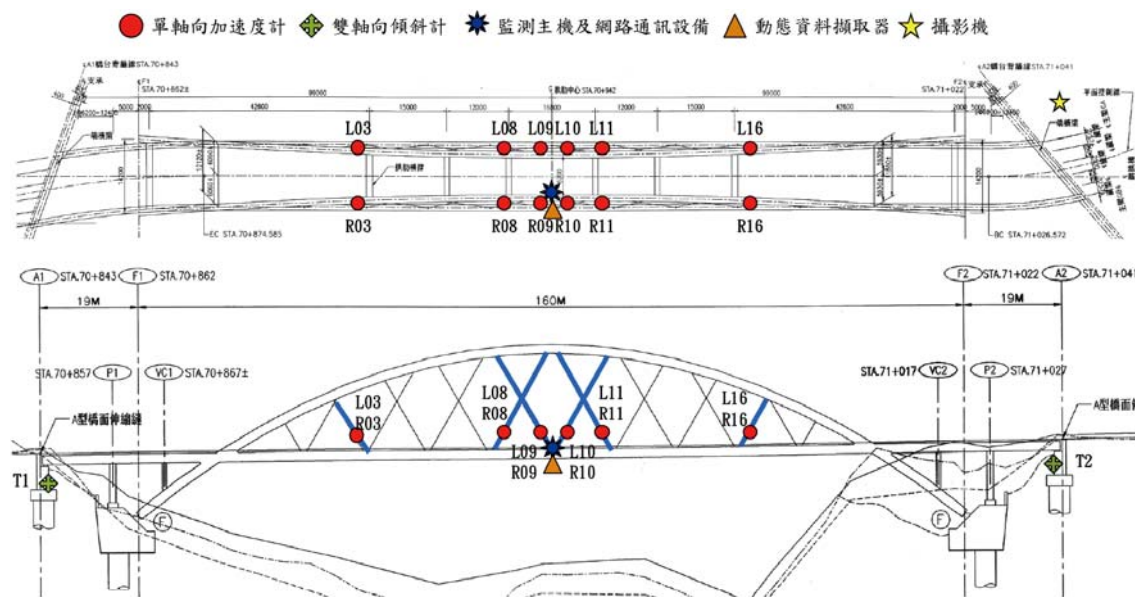


圖 9 監測儀器設備配置圖

表 3 監測系統之儀器設備規格、數量及用途

項目	廠牌	型號	數量	安裝位置	用途
單軸向加速度計	Tokyo Sokushin	AS-2000	12 個	上 (L)、下 (R) 游側斜吊索 (編號 3、8、9、10、11、16)	監測斜吊索振動加速度 (索力) 變化
雙軸向傾斜計	Geomaster	MTM-15D	2 個	A1、A2 橋台	監測橋台傾斜角變化
攝影機	Lilin	IPS4308E	1 台	上游側 A2 橋台附近	監視橋梁即時影像
動態資料擷取器	Geomaster	DSPL-24	2 台	橋梁下游側跨中處護欄外側監測箱內	擷取監測資料
監測主機及網路通訊模組	Lenovo	M93p	1 台	橋梁下游側跨中處護欄外側監測箱內	儲存監測資料，即時運算分析處理
監測網頁展示平台	-	-	1 式	雲端平台	即時展示監測分析結果及橋梁現況

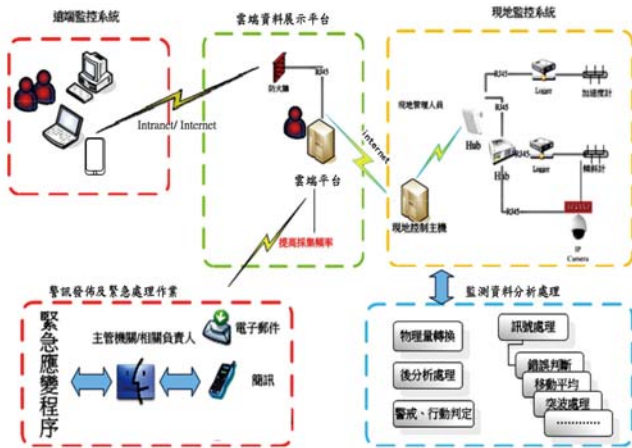


圖 10 監測系統構架

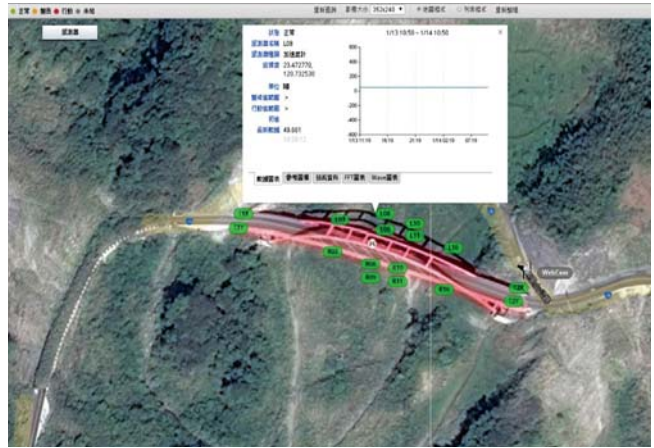


圖 11 監測網頁平台

A2 橋台上游側保護邊坡的擋土牆上（如圖 12f），監測箱則安裝於下游測跨中處護欄外側（如圖 12g），資料擷取器、監測主機、通訊模組則放置於監測箱內（如

圖 12h），於線路及感測器安裝完成後，便須立刻測試監測主機、資料擷取器、感測器之間的連線及網路通訊狀況是否良好。



a. 交通維持設施佈設



b. 加速度計組裝



c. 管線配置



d. 加速度計安裝完成



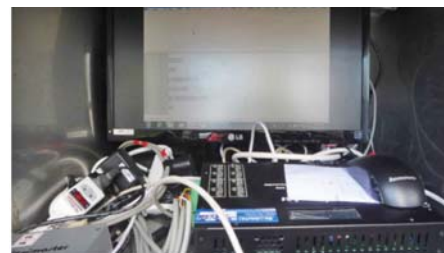
e. 傾斜計安裝完成



f. 攝影機安裝完成



g. 監測箱安裝完成



h. 資料擷取器、監測主機、通訊模組

圖 12 監測系統安裝照片



## 監測訊號分析

本文採用的監測資料擷取設定方式為每 30 分鐘記錄一筆 5 分鐘的資料，取樣頻率為 200 samples/sec。圖 13 為 12 月 1 日上游 (L) 側各監測吊索加速度振動歷時曲線，圖中顯示車流狀態下，加速度最大值均低於 0.016 g，其中 L03、L08、L09 振動幅度相當、L10、L11、L16 振動幅度相當。圖 14 為整理 12 月 1 日、12 月 2 日各 3 筆監測資料進行頻譜分析的結果，分析時採用 214 = 16,384 點 (81.92 秒) 資料進行分析。分析結果顯示 L03 吊索主要頻率為 6.76 HZ，L08 吊索主要頻率為 3.93 HZ、7.84 HZ，L09 吊索主要頻率為 4.37 HZ、8.89 HZ，L10 吊索主要頻率為 4.17 HZ、8.33 HZ，L11 吊索主要頻率為 2.92 HZ、6.23 HZ、9.50 HZ，L16 吊索主要頻率為 7.87 HZ。

表 4 為監測資料分析結果與設計值比較之索力分析，表中顯示由數值模型與弦理論公式推算之索力值與初始設計索力值大致相近，顯示透過數值模型或弦理論公式等方式計算索力，可有助於達到比對及驗證監測成果的目的。

表 4 索力值 (單位: tf)

吊索編號	L03	L08	L09	L10
初始設計值	43.4	43.7	44.9	43.2
數值模型 $T = af_1^2 + df_1 + c$	43.6	48.6	55.8	50.8
弦理論公式 $T = 4mL^2 (f_n/n)^2, n = 1$	39.3	41.5	47.4	43.2

## 結論與建議

本文顯示藉由橋梁監測系統及數值模型的建立，可以有效輔助橋梁營運安全管理。以竣工圖所紀錄結構尺寸、材料參數等資料，建立橋梁數值模型，再透過模態分析及監測資料分析，可以有效的比對出橋梁的主要監測頻率。最終目的係以調整數值模型中吊索索力的方式，預先建立頻率 (f) 與索力 (T) 關係資料表，如此便可由監測資料即時推算出吊索索力的變化情形。透過即時的橋梁安全監測系統，便可透過電腦、智慧型手機遠端登入監測平台，並即時取得颱風、豪雨事件發生前、中、後橋梁的狀況，提供為橋梁管理人員評估橋梁安全的依據，有效提升管理效能及檢測勘查作業的安全性，並達到確保用路人安全的目的。

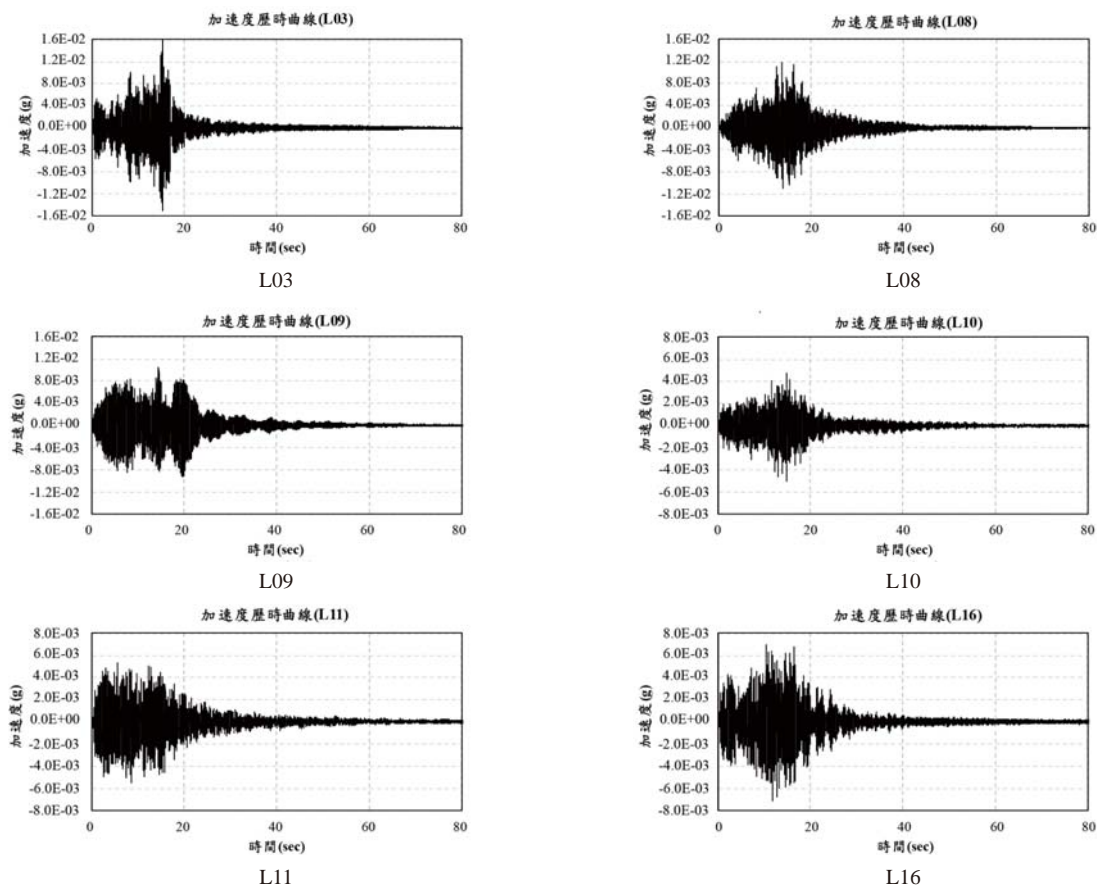


圖 13 車流狀態下上游側各吊索加速度振動歷時曲線

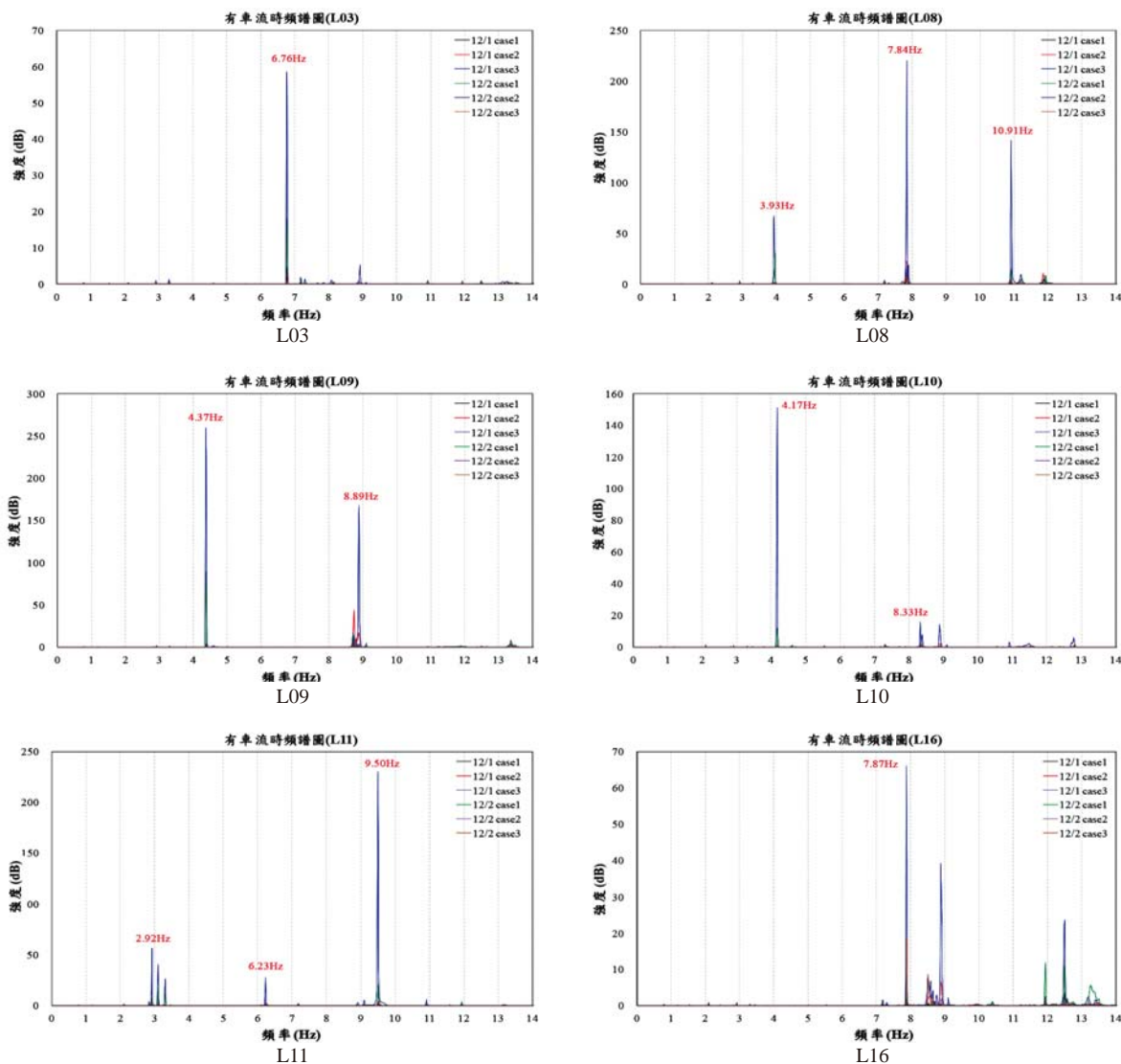


圖 14 車流狀態下上游側各吊索振動頻譜圖

## 誌謝

感謝交通部公路總局第五區養護工程處提供本計畫經費，阿里山工務段指導及崧浩科技有限公司協助監測系統之安裝。

## 參考文獻

- 吳進興、吳文隆、蕭秋安、周坤賢，「極端氣候下公路邊坡災害復建工程設計探討」，中華技術，第 105 期，第 160-173 頁 (2015)。
- 蔡宗成、賴世寶、陳致遠，「莫拉克風災台 18 線 71K+100 芙谷峽橋設計與施工」，台灣公路工程，第 40 卷第 8 期 (2014)。
- 林曜滄、曾榮川、林正偉、林彥君、蔡建民、陳玫君、賴世寶、蔡宗成，「莫拉克風災台 18 線 71K (芙谷峽橋) 道路復建工程設計與施工」，鋼結構工程，第 51 期，第 9-27 頁 (2015)。
- Chang, K.C. Lee, Z. K. and Chen, C. C., "Structural Assessment of a repaired cable bridge damaged in 1999 Chi-Chi earthquake," Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan, pp. 1822-1833 (2012).
- Debora, S. N. Parivallal, S. Ravisankar, K. and Hemalatha, G., "Evaluation of Cable Tension Using Vibration Based Methodologies for Health Monitoring of Structures," International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, No. 6, pp. 506-514 (2015).
- Caetano, E. and Cunha, A., "Dynamic testing of cable structures," Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Duebendorf, Switzerland, 01002-pp. 1-15 (2015).
- Nguyen, K.D. and Kim, J. T., "Vibration-Based Monitoring of Stay-Cable Force Using Wireless Piezoelectric-Based Strain Sensor Nodes," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 32, No. 6, pp. 669-677 (2012).
- Yang, M. Ma, H. Zeng, Q. Y. Yang, J. J. and Chen, Z. S., "Short-Term Deformation Monitoring Analysis for a Large Span Cable Stayed Bridge," Modern Applied Science, Vol. 8, No. 6, pp. 37-46 (2014).
- Sim, S. H. Li, J. Jo, H. Park, J. W. Cho, S. Spencer Jr, B. F. and Jung, H. j., "A wireless Smart Sensor Network for Automated Monitoring of Cable Tension," Smart Materials and Structures, Vol. 23, pp. 1-10 (2014).
- Yu, C. P. Lai, J. Cheng, C. C. and Chiang, C. H., "Direct Evaluation of Effective Lengths of Vibrating Cables Using Responses from Dual/Three Transducers," Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 51-60 (2013).