

# 橋梁動態地磅監測技術及運用

三聯科技股份有限公司 / 鄭丁興

## 一、前言

隨著經濟不斷成長，重車超載是造成瀝青路面開裂、凹陷及使用壽命驟減的主要原因。橋梁方面雖然國內尚未有因重車超載導致斷橋之案例，然而隨著橋梁使用年久及交通量的日益增加，橋梁結構容易產生疲勞破壞，若缺乏結構安全監測與管理，會有發生斷橋的可能。例如在 2007 年 8 月，美國明尼蘇達州明尼亞波利市，一座橫跨密西西比河上的主要橋梁突然倒塌，主要原因歸咎於老舊橋梁年久失修，而交通量卻日益增加，導致鋼骨結構疲勞破壞，最終還是發生斷橋 [ 陳士文，2013 ]。2017 年 APEC 重車超載研討會討論重點 [ 呂文玉 & 陳逸裕，2017 ] 有關於車輛超載監控是否建置交通攝影機、靜態地磅、動態地磅 (Weight-In-Motion, WIM) 或活動地磅等相關科技；在資料收

集方面，有無蒐集並分析橋梁重車相關資料。為防範砂石車超載，交通部自 2001 年 7 月 1 日起要求裝載砂石、土方之傾卸式半拖車及 20 噸以上傾卸式大貨車等車輛，應依「車輛安全審驗基準」規定，安裝載重計顯示該車輛裝載重量 [ 呂文玉 & 陳逸裕，2017 ]。目前重型車輛之超載執法取締仍多以靜態地磅進行，其所需土地面積龐大且設置經費較高，且受測車輛須以低速過磅或靜止方式方能秤重，不僅造成取締效率難以大幅提高，無法有效抑止日益嚴重之超載現象，所以，採用高速過磅之動態地磅逕行取締超載，並制定檢驗規範為未來之發展方向 [ 呂文玉 & 陳逸裕，2017 ]。2013 年 12 月計程電子收費實施後，為使高速公路地磅站設施亦能配合計程收費之實施理念，提昇車輛載重管理之效率，高速公路局將逐步試辦「主線篩選式

## 二、現行車重動態監測方法

動態地磅系統」，並結合 ETC 電子收費系統，做為我國高速公路實施電子收費後之車輛重量管理系統 [呂文玉 & 陳逸裕，2017]。但此方式只得到車輛重量，無法評估對橋梁結構之影響。因此，以橋梁動態反應來反算車重之橋梁動態地磅 (Bridge Weight-In-Motion, B-WIM)，成為一研究重點。本研究將從橋梁結構在重車通行下的單一自由度系統結構反應，探討車輛重量之反算，橋梁衝擊係數 (Bridge Impact Factor, BIF) 之估算及動態載重係數 (Dynamic Load Factor, DLF) 之計算。

目前臺灣的橋梁設計規範 [交通部，2019]，基本上是依據美國 AASHTO 規範，國道高速公路橋梁採用 HS20-44x1.25(美國稱為 HS25)，如圖 1 所示。歐洲科技合作組織 (Cooperation for Science and Technology, COST)323 規範工作小組於 1999 年提出歐洲動態地磅規範，將車量類型分為 8 種，如圖 2 所示。

現行車輛動態監測方法主要分為二類，一類為動態地磅 (Weight-In-Motion, WIM)，直接量測車重及軸重，又可細分為固定式及移動式，可用在鋪面壽命及橋梁安全評估；另一類

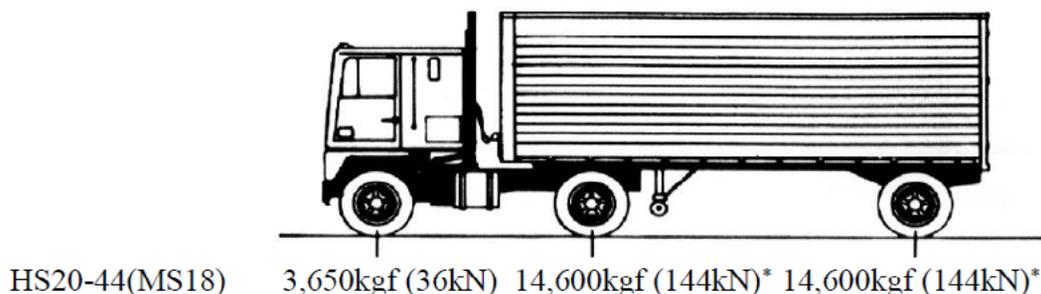


圖 1. HS20-44 車輛軸重 [交通部，2019]

| Category   | Silhouette           | Description   |
|------------|----------------------|---|
| Category 1 | Cars, vans (< 35 kN) | Cars, cars+light trailers or caravans                         |
| Category 2 |                      | Two axle rigid lorry  |
| Category 3 |                      | More than 2-axle rigid lorry                                  |
| Category 4 |                      | Tractor with semi-trailer supported by single or tandem axles |
| Category 5 |                      | Tractor with semi-trailer supported by tridem axles           |
| Category 6 |                      | Lorry with trailer  |
| Category 7 |                      | Busses  |
| Category 8 |                      | Other vehicles  |

圖 2. 車輛類型 [COST 323, 1999]

為橋梁動態地磅 (Bridge Weight-In-Motion, B-WIM)，以橋梁動態反應來反算車重及軸重，主要用在橋梁安全評估，鋪面壽命評估較不適合。各種類型動態地磅綜整如下 [US DoT, 2018]：

### (一)、動態地磅 (WIM)

#### 1. 固定式動態地磅：

依感測器類型分為下列五種。

##### (1) 撓曲版型式 (Bending Plate)

如圖 3 所示，車輛經過撓曲版產生的應變來計算軸重、軸距與車速，取樣率約為 2000Hz。結果準確度可 (10%)，耐久性佳，溫度效應小，成本中高，較適合剛性鋪面。

##### (2) 荷重規型式 (Load Cell)

如圖 4 所示，車輛經過時荷重規直接量軸重、軸距與車速，取樣率約為 2000Hz。結果準確度高 (6%)，耐久性佳，溫度效應小，成本高，較適合剛性鋪面。

##### (3) 壓電聚合物型式 (Polymer Piezo Sensor)

如圖 5 所示，車輛經過時壓電聚合物的電壓變化直接量軸重、軸距與車速，取樣率約為 2000Hz。結果準確度最差 (15%)，耐久性差，溫度效應大，成本低，剛性與柔性鋪面皆適合。

##### (4) 壓電石英晶體型式 (Quartz Piezo Sensor)

如圖 6 所示，車輛經過時壓電石英晶體電壓變化直接量軸重、軸距與車速，取樣率約為 2000Hz。結果準確度高 (6%)，耐久性可，溫度效應小，成本居中，剛性與柔性鋪面皆適合。

##### (5) 長條應變型式 (Strain Gauge Strip Sensor)

如圖 7 所示，車輛經過時應變計型荷重規直接量軸重、軸距與車速，取樣率約為 2000Hz。結果準確度高 (6%)，耐久性可，溫度效應小，成本中低，剛性與柔性鋪面皆適合。

#### 2. 移動式動態地磅：

如圖 8 所示，主要為壓電型式 (Portable Piezo WIM)，車輛經過時壓電體的電壓變化直接量軸重、軸距與車速，取樣率約為 2000Hz。結果準確度最差 (25%)，耐久性差，溫度效應大，成本最低，剛性與柔性鋪面皆適合。



圖 3. 撓曲版型式動態地磅 [US DoT, 2018]

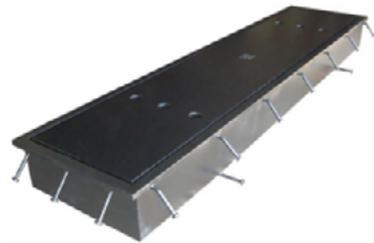


圖 4. 荷重規型式動態地磅 [US DoT, 2018]

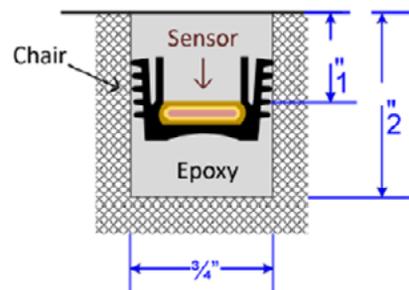


Figure 16 - Polymer Piezo Installation Depiction

圖 5. 壓電聚合物型式動態地磅 [US DoT, 2018]

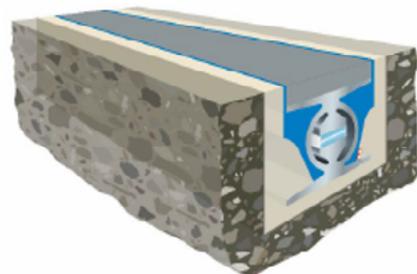


圖 6. 壓電石英晶體型式動態地磅 [US DoT, 2018]



Figure 21 – Strain Gauge Strip Sensor

圖 7. 長條應變型式動態地磅 [US DoT, 2018]



Figure 24 – Single Lane Portable WIM Sensor

圖 8. 移動式壓電型式動態地磅 [US DoT, 2018]

## (二)、橋梁動態載重 (B-WIM)

第二種方法稱為橋梁動態載重 (Bridge Weight-In-Motion, B-WIM)，此方法是藉由橋梁本身結構反應 (應變、位移、速度、加速度或傾角等)，如圖 9 所示 (使用應變計)，反算出通過車輛之總重，軸重與車速之估算則準確度較差，此方法目前已在多座現地橋梁實地實驗測試中，其優點在於不需要影響路面交通即可進行監測，以及除了能夠監測通過車輛之軸重與總重外，還能監測與紀錄通過車輛通行頻率，觀察橋梁結構反應長時間的變化，是否有劣化或疲勞破壞的情形，以利提前對有損傷之橋梁進行維護，也有助於未來的橋梁設計。但其缺點為，每座橋結構反應不一樣，溫度效應大，多車通行會影響準確度，感測器選擇與安裝位置，同時結果判讀需要專家協助。

Kalin 等人針對不同橋梁結構進行實驗測試，以探討應變反應是否能夠計算出車軸資訊，圖 10 結果指出，並非所有橋梁類型都是適用 [Kalin et al., 2006]。

Žnidarič 與 Kalin 採用影響線 (Influence Lines) 原理，由應變計型式橋梁動態載重量測結果，反算橋梁的動態放大係數 ( $DAF = \epsilon_T / \epsilon_s$ )

[Žnidarič & Kalin, 2020]，其定義如圖 11 所示，DAF 與車重關係示於圖 12。結果顯示，重車的動態放大係數會較小。



Figure 23 – B-WIM Installation

圖 9. 應變計型式橋梁動態載重 [US DoT, 2018]

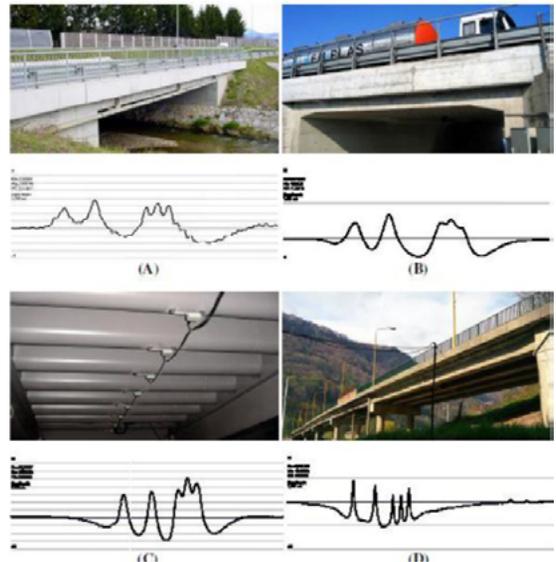


圖 10. 不同橋梁結構應變反應 [Kalin et al., 2006]

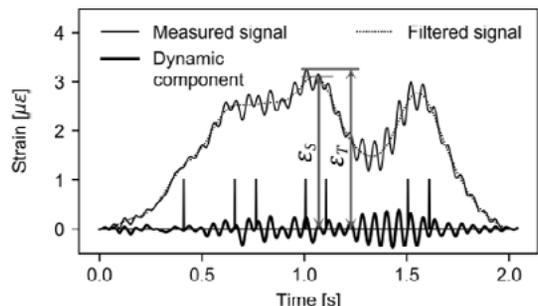


圖 11. 動態放大係數之定義 ( $DAF = \epsilon_T / \epsilon_s$ ) [Žnidarič & Kalin, 2020]

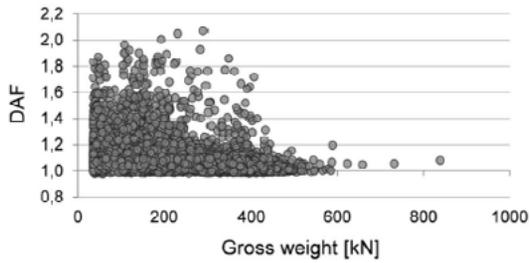


圖 12. 動態放大係數與車重之關係 [Žnidarič & Kalin, 2020]

由於一般應變計有零點飄移及溫度效應明顯的缺點，Cartiaux 等人採用 OSMOS 公司的光纖應變計 (Optical Strands) 做橋梁動態載重監測 [Cartiaux et al., 2019]，其應變監測值雜訊低 (如圖 13 所示)，實際車重與估計值相關性高 (如圖 14 所示)，亦能準確估算軸距及車速 (如圖 15 所示)，但建置成本較高。三聯科技於 2021 年引進此技術於關渡大橋進行橋梁動態載重監測，可即時得到車輛及橋梁反應相關資訊 (如圖 16 所示) [Sanlien Technology, 2021]。

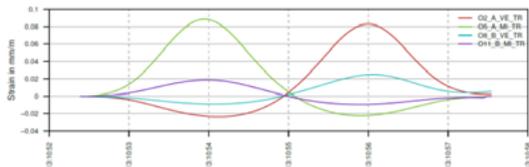


圖 13. OSMOS 光纖應變計量測結果 [Cartiaux et al., 2019]

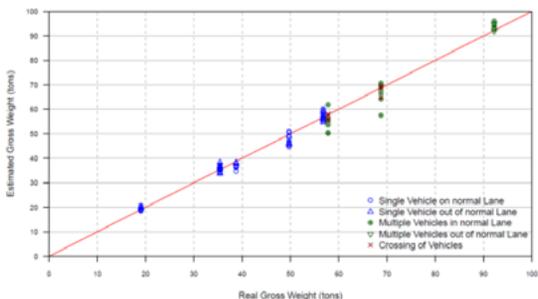


圖 14. OSMOS 系統車重估算值與實際值之關係 [Cartiaux et al., 2019]

|                         |                            |
|-------------------------|----------------------------|
| Time :                  | 2019/02/21 at 13:10:52 UTC |
| Maximum Strain (mm/m) : | 0.0887                     |
| Gross Weight (tons) :   | 53.8                       |
| Number of Axles :       | 5                          |
| Speed (km/h) :          | 52.7                       |
| Direction :             | N-S                        |

Figure 4. Typical results on a Passage Data Sheet

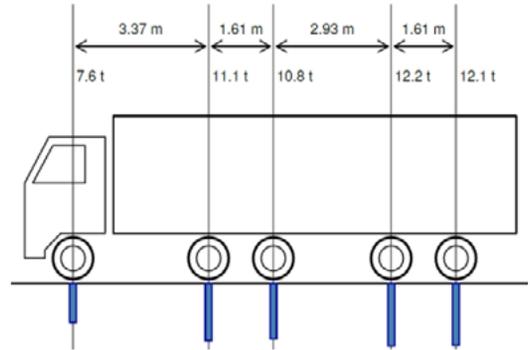


圖 15. OSMOS 系統估算軸距與車速 [Cartiaux et al., 2019]

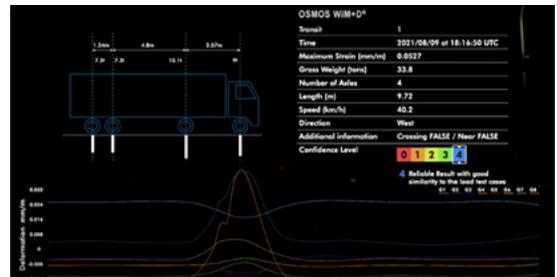


圖 16. OSMOS 系統在關渡大橋監測成果 [Sanlien Technology, 2021]

### 三、單一自由度系統橋梁動態載重監測

由於現行橋梁動態載重監測系統成本高，且計算方法較複雜。本研究將從橋梁結構在重車通行下的單一自由度系統結構反應，探討車輛重量之反算，橋梁衝擊係數 (BIF) 之估算及動態載重係數 (DLF) 之計算。此演算法為一個利用單自由度系統之識別技術，基於線性系統之假設，採用結構物加速度訊號反推載重歷程。車輛通行時，量測橋面板中點加速度紀錄  $\ddot{X}(t)$ ，以等加速度法求位移  $X(t)$  與速度  $\dot{X}(t)$  在

時間  $t=(n+1) \Delta t$  時

$$X_{n+1} = X_n + \dot{X}_n \Delta t + \frac{1}{2} \frac{(\ddot{X}_n + \ddot{X}_{n+1})}{2} \Delta t^2$$

$$\dot{X}_{n+1} = \dot{X}_n + \frac{(\ddot{X}_n + \ddot{X}_{n+1})}{2} \Delta t \quad \text{—— (1)}$$

需用基線校正法，先消除低頻雜訊，疊代得位移  $X(t)$  與速度  $\dot{X}(t)$  歷時，加速度及位移歷時示於圖 17，紅色為位移平滑化曲線。

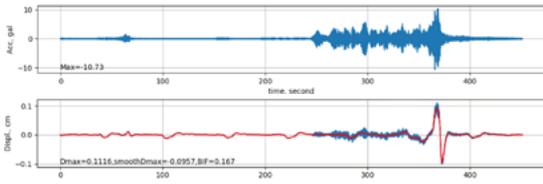


圖 17. 車量通行時橋跨中點加速度及積分後位移歷時，紅色為位移平滑化曲線

將橋面板假設為單自由度 (SDOF) 系統

$$m\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = P(t) \quad \text{—— (2)}$$

轉換為

$$\ddot{X}(t) + 2\xi\omega\dot{X}(t) + \omega^2X(t) = \frac{P(t)}{m}$$

$$\xi = \frac{C}{2m\omega} \quad \omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \text{—— (3)}$$

將  $\ddot{X}(t)$ 、 $\dot{X}(t)$  與  $X(t)$  代入上式中，可得單位質量的載重歷時  $\frac{P(t)}{m}$  (示於圖 18)，紅色為其平滑化曲線，可發現車載在橋面板之時間。

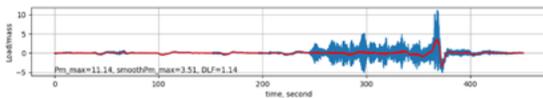


圖 18. 車量通行時橋跨中點單位質量的載重位移歷時反算結果，紅色為其平滑化曲線

橋梁衝擊係數 (BIF)

$$BIF = \frac{X_{dyn}}{X_{s\_smooth}} - 1 \quad \text{—— (4)}$$

其中， $X_{dyn}$  為  $X(t)$  的最大值， $X_{s\_smooth}$  為  $X(t)$  平滑化後最大值

動態放大係數 (DLF)

$$DLF = \frac{X_{dyn}}{X_s} \quad X_s = \frac{P_s}{K} = \frac{P_s}{m\omega^2} \quad \text{—— (5)}$$

其中， $P_s$  為車重， $K$  為橋面板勁度， $m$  為橋面板質量， $\omega$  為橋面板自然頻率。

當  $P_s$  為未知時，可用  $\frac{P(t)}{m}$  平滑化後之最大值來預估。亦可經由橋梁靜動態載重試驗結果，可得橋面板垂直向勁度 ( $K$ )、自然頻率、平滑化後之最大值來預估衝擊係數等參數，以推估橋面板有效質量  $m$  及驗證車載演算法之正確性。

以一座七跨橋梁動態載重試驗為例，如圖 19 所示，卡車重 25 噸 (ton)，以每小時 40 公里等速來回行駛，加速規安裝於 Span 1、3、5 & 7 之跨距中央，Span 1 & 7 之自然頻率為 0.952Hz，其餘跨距之自然頻率為 0.755Hz。正向行駛之加速度量測值、位移及單位質量載重反算歷時，如圖 20 所示，紅色為其平滑化曲線；反向行駛之歷時，如圖 21 所示。最大加速度、位移、單位質量載重 ( $P/m$ )、橋梁衝擊係數 (BIF) 及動態載重係數 (DLF) 比較表，示於表 1。結果顯示，最大位移及單位質量載重 ( $P/m$ ) 之誤差皆在 10% 以內；動態載重係數 (DLF) 之誤差則在 1% 以內；最大加速度之誤差在 15% 以內；而橋梁衝擊係數 (BIF) 之誤差則在 20% 以內。因此，本方法可用來預測最大位移、單位質量載重 ( $P/m$ ) 及動態載重係數 (DLF)，橋梁衝擊係數 (BIF) 則誤差大，但仍可作為參考。

#### 四、結語

本研究從橋梁結構在重車通行下的單一自由度系統結構反應，只需在橋跨中央放置一加速規，即可反算出車輛重量及橋跨最大位移，誤差在 10% 以內，並推估橋梁衝擊係數 (BIF) 及動態載重係數 (DLF)，雖然橋梁衝擊係數誤

差大 (20% 以內)，但仍具參考價值，動態載重係數則非常準確，誤差在 1% 以內。本方法簡單，成本低，但仍需進一步研究，可以探討橋梁型式、車輛型式及車速之影響。若將來能推廣至國內橋梁長期監測，不只可以得到車輛重量、橋跨最大位移，以評估橋梁安全及疲勞破壞之風險，亦可監控強震來臨時，橋梁結構之安全性。

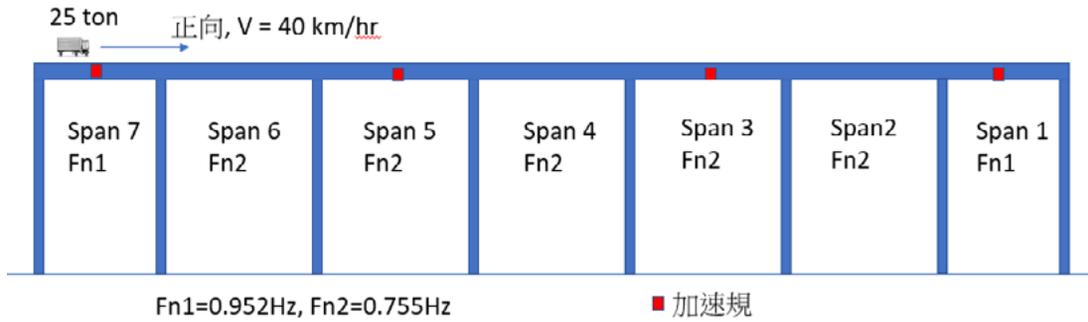


圖 19. 橋梁動態載重試驗示意圖

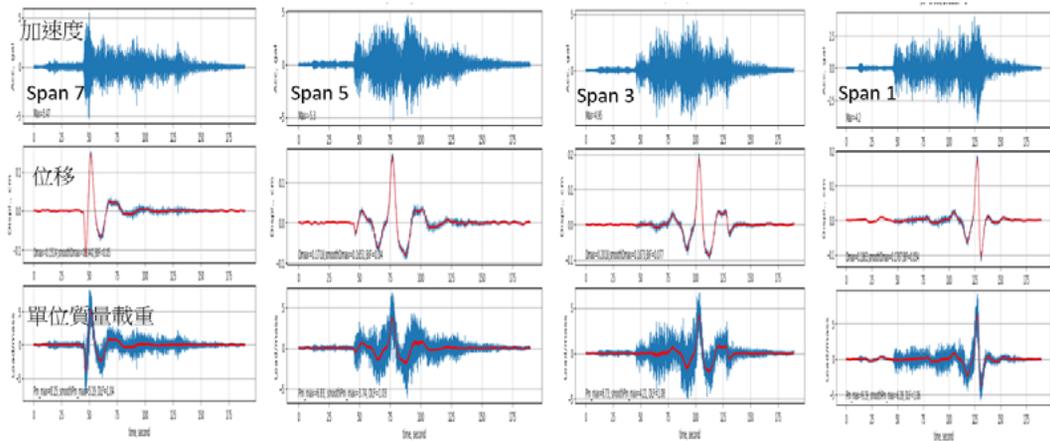


圖 20. 正向行駛之加速度、位移及單位質量載重歷時，紅色為其平滑化曲線

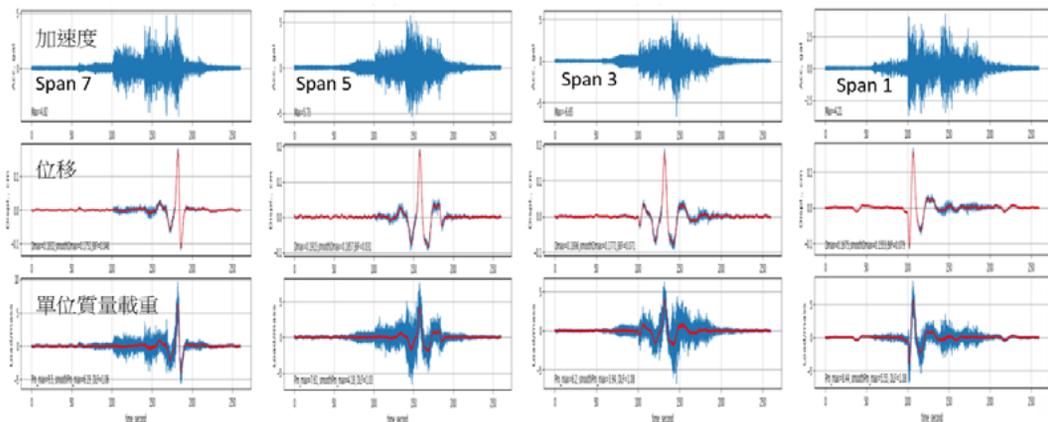


圖 21. 反向行駛之加速度、位移及單位質量載重歷時，紅色為其平滑化曲線

**表 1. 最大加速度、位移、單位質量載重、BIF  
及 DLF 比較**

| 最大加速度, gal                | Span 7 | Span 5 | Span 3 | Span 1 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 正向                        | 8.13   | 8.64   | 7.32   | 7.47   |
| 反向                        | 10.82  | 10.75  | 6.44   | 8.62   |
| 最大誤差(%)                   | 14.20  | 10.88  | 6.40   | 7.15   |
| 最大位移, cm                  | Span 7 | Span 5 | Span 3 | Span 1 |
| 正向                        | 0.1832 | 0.1915 | 0.1896 | 0.1675 |
| 反向                        | 0.1514 | 0.1718 | 0.2018 | 0.1863 |
| 最大誤差(%)                   | 9.50   | 5.42   | 3.12   | 5.31   |
| 平滑化最大位移, cm               | Span 7 | Span 5 | Span 3 | Span 1 |
| 正向                        | 0.1752 | 0.1857 | 0.1771 | 0.1553 |
| 反向                        | 0.1442 | 0.1651 | 0.1873 | 0.1767 |
| 最大誤差(%)                   | 9.71   | 5.87   | 2.80   | 6.45   |
| 最大單位質量載重<br>(P/m), gal    | Span 7 | Span 5 | Span 3 | Span 1 |
| 正向                        | 9.50   | 7.61   | 6.73   | 8.44   |
| 反向                        | 8.15   | 6.83   | 6.73   | 9.19   |
| 最大誤差(%)                   | 7.65   | 5.40   | 0.00   | 4.25   |
| 平滑化最大單位質<br>量載重(P/m), gal | Span 7 | Span 5 | Span 3 | Span 1 |
| 正向                        | 6.19   | 4.18   | 3.94   | 5.55   |
| 反向                        | 5.19   | 3.74   | 4.21   | 6.28   |
| 最大誤差(%)                   | 8.79   | 5.56   | 3.31   | 6.17   |
| BIF                       | Span 7 | Span 5 | Span 3 | Span 1 |
| 正向                        | 0.046  | 0.031  | 0.071  | 0.079  |
| 反向                        | 0.050  | 0.040  | 0.077  | 0.054  |
| 最大誤差(%)                   | 4.17   | 12.68  | 4.05   | 18.80  |
| DLF                       | Span 7 | Span 5 | Span 3 | Span 1 |
| 正向                        | 1.06   | 1.03   | 1.08   | 1.08   |
| 反向                        | 1.04   | 1.03   | 1.08   | 1.06   |
| 最大誤差(%)                   | 0.95   | 0.00   | 0.00   | 0.93   |

## 參考資料

- [1] 呂文玉、陳逸裕，APEC 運輸工作小組重車超載研討會會議報告，交通部，2017。
- [2] 陳士文，橋梁動態載重識別之直接正規化法，中央大學土木系碩士論文，2013。
- [3] 交通部，公路橋梁設計規範，2019。
- [4] Cartiaux, F.-B., Koutsonika, S., Andrikopoulos, G., and Pelletier, P. M., Bridge Monitoring & Assessment via OSMOS Optical Strands, 4th Joint International symposium on deformation monitoring (JISDM), 2019.
- [5] COST 323, Weight-in-Motion of Road Vehicles, European WIM Specification, NATO, 1999.
- [6] Kalin, J., Žnidarič, A., and Lavric, I., Practical Implementation of Nothing-On-The-Road Bridge Weigh-In-Motion System, The 9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, 2006.
- [7] Sanlien Technology, Bridge Structural Monitoring with Weigh in Motion & Deformation (SHM \_ WM+D), <https://www.youtube.com/watch?v=XX0Qayp8ptE>, 2021.
- [8] US DoT, Weight-In-Motion Pocket Guide, No. FHWAOL18-015, 2018.
- [9] Žnidarič, A., and Kalin, J., Using bridge weigh-in-motion systems to monitor single-span bridge influence lines, J. of Civil Structural Health Monitoring, pp.743-756, 2020.