

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

夾式位移計用於橋梁健康監測之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-216-010-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：中華大學土木與工程資訊學系

計畫主持人：楊國湘

計畫參與人員：李金榮、莊士弘、鄧智豪、黃文祥、吳孝謙

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 10 月 31 日

夾式位移計用於橋梁健康監測之研究

A Study of Bridge Health Monitoring System by Using
Clip-on Gages

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC 94 - 2211 - E - 216 - 010 -
執行期間： 94 年 8 月 1 日至 95 年 7 月 31 日

計畫主持人：楊國湘

共同主持人：

計畫參與人員：李金榮、莊士弘、鄧智豪、黃文祥、吳孝謙

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：中華大學土木與工程資訊學系

中 華 民 國 95 年 10 月 31

中文摘要

台灣由於氣候潮溼、河短流急，因此橋梁常需面對沖刷、老化、劣化嚴重的情形，一旦面對較大規模颱風、地震災害時，橋梁斷裂、毀壞的情況屢有發生，為了增加橋梁使用的安全，運用儀器監測橋梁健康狀態，實有其必要性。

傳統的橋梁監測方式，是在感測器讀取訊號後，再藉由監測系統轉化成可分析的資料，以掌握結構可能的行為變化，使能對異常情形提出預警，防患於未然。一般於橋梁監測上會使用傾斜計作為感測器，以其量測出之傾斜度而後積分得到垂直變位。若要做到可量測結構的應力行為，則普遍會裝設應變規做為感測器，但其佈置數目龐大，在結構複雜時，實際執行上配線亦相當繁瑣，且不可重複使用，若沒有良好的保護措施，使用壽命亦短。

本論文之主要目的是運用夾式位移計製作簡單、價錢便宜、精確度高與可重複使用之優點，以夾式位移計取代傳統的應變規做為橋梁健康監測的感測器，此外搭配分散式資料擷取系統以建構具有遠端監測能力的橋梁健康監測系統。讓此監測系統能夠有效的量測橋梁的載重、垂直位移與混凝土所承受的最大應變，並能隨時校正監測系統量測資料的正確性。

關鍵詞：橋梁健康監測、夾式位移計、橋梁變位

ABSTRACT

Due to the moist climate and the steep landscape in Taiwan, the river is always running down from a mountain fast and with great deal of sand and rock. A cross river bridge is often needed to face serious environment condition. Natural disaster such as typhoon and earthquake will also cause bridge collapses occasionally. In order to increase the safety of bridge, structural health monitoring system of bridge are necessary.

In order to obtain the damage conditions of bridge structures, a bridge monitoring system uses sensor to measure structural deformation. After that the monitoring system can transfer the analog signal to digital data for further analysis. Inclinator and strain gages are normally used to measure the deformations of bridge. However, the inclinometer can only be used to measure the vertical displacement of bridge which may not relate to the bearing strain of bridge. Strain gage not only require a lot of installation work, but also has limited service life.

The clip-on gage is not only inexpensive, easy to manufacture, reusable, but also can measure displacement with good precision. As a result, it can be used to substitute the traditional strain gages as the bridge health monitor sensory element. The objective of the study is to develop a bridge health monitoring system by using clip-on gages with distributed data acquisition system. The system not only allows monitoring data transmitting through internet, but also can continually monitor the vertical displacement, loading and bearing strains of bridge to exhibit the health condition of the bridge.

Keyword: Bridge Health Monitoring System, Clip-on Gage, deformations of bridge

前言

台灣橋梁由於身處之地理位置，氣候潮溼，河短流急，常需面對沖刷、老化、劣化嚴重的情形。早期設計之橋梁更因當時規範的不完備，而普遍有耐震強度不足的問題，一旦面對較大規模颱風、地震災害時，橋梁斷裂、毀壞的情況屢有發生。然而橋梁損壞所造成的交通阻隔，故對橋梁的診斷評估、監測，實有其必要性。而橋梁監測方式，是在橋梁上裝設適當的感測器，感測器讀取訊號後，再藉由監測系統轉化成可分析的資料，以掌握結構可能的行為變化以及對異常情形能提出預警，防患於未然。

一般橋梁監測上會使用的感測器種類繁多：如傾斜計、應變規、加速度規、位移計、等...，如以傾斜計作為感測器，則是運用其量測橋面版之傾斜角，而後積分量測角度得到垂直變位，或是應用傾斜計量測樁基礎的傾斜角。若要量測結構的應力行為，一般會運用應變規量測材料的受力變形，一般而言其所需佈置數目龐大，在結構複雜時，實際執行上配線亦相當繁瑣，且不可重複使用，若沒有良好的保護措施，使用壽命亦短。近年來有些

研究學者嘗試使用光纖應變規量測橋梁結構的應變，雖然光纖應變規的使用年限較長，而且監測訊號不會受到電磁的干擾而產生較多的雜訊，然而售價十分昂貴，以成本效益而言，現階段大多用於學術研究，並未廣泛的被採用。

雖然目前台灣少數結構特殊之橋梁已裝設結構監測系統，並卓具成效的，然而以筆者個人之淺見，現階段橋梁監測所遭遇的困難不外乎，資料擷取系統或是感測器之售價昂貴，限制橋梁健康監測系統裝設的普遍性；其次、感測器與資料擷取系統所監測的訊號會隨著溫度的變化而改變，長時間監測後，監測系統訊號飄移量可影響結構監測訊號的正確性；此外、橋梁在長期負載下，結構會隨著時間的增長而逐漸老化，橋梁的各部結構也會產生永久變形，一旦遇到監測中感測器的損壞，在置換的過程中往往無法尋回監測之原始基準點，因而降低監測資料的可用性。

此外在橋梁健康監測的過程中，監測數據必須與橋梁健康狀態相關聯，以合理的設定橋梁健康狀態的警戒值與行動值，而這些數值的設定必須與橋梁設計時所允許的載重、垂直位移與混凝土所承受的最大應變相關，因此作為橋梁健康監測的感測器量必須能夠有效的量測這些數值。

研究目的

為了解決以上的問題，本研究嘗試使用夾式位移計用於橋梁健康監測的感測器，搭配分散式資料擷取系統，以期建構一套裝設便利、準確度高而裝設成本低於十五萬元以下的橋梁健康監測系統，以期未來可廣泛的運用於老舊或危險橋梁的健康監測。

因此本研究之主要目的是運用夾式位移計製作簡單、價錢便宜、精確度高與可重複使用之優點，以夾式位移計取代傳統的應變規做為橋梁健康監測的感測器，此外搭配分散式資料擷取系統以建構具有遠端監測能力的橋梁健康監測系統。為了讓此監測系統能夠有效的量測橋梁的載重、垂直位移與混凝土所承受的最大應變，並能隨時校正監測系統量測資料的正確性，本研究必須完成下列目標：

- 一、設計與製作可用於橋梁變形監測的夾式位移計，讓位移計能夠具有適宜的量測長度與敏感度以量測混凝土材料受力的應變。
- 二、以分散式資料擷取系統為基準，運用網際網路發展橋梁健康監測系統，能運用由感測器所傳回的監測資料計算橋梁的載重、垂直位移與混凝土承受的應變。
- 三、提供簡易的校正方式，讓健康監測使系統在長期監測過程中確保監測資料的正確性。

文獻探討

由於結構監測系統是人民生命安全的護衛者，因此國內外許多研究學者針對不同的結構物以不同的方式從事結構監測的研究，本研究僅就近年來這些研究學者之相關研究成果加以探討：

針對橋梁安全的監測預警系統，國內研究學者中有，李有豐、施邦築及陳怡智針對土石流危險區內規劃橋梁監測與預警系統[1]，他們分別介紹橋基沖刷監測系統與土石流監測系統軟硬體之配置及其功能。張仕京、陳紹釗與魏錦銘則介紹自強大橋所從事的橋基保護與補強[2]，施工時為了避免橋梁崩塌，因此設置傾斜計與管式沉陷計以維護橋梁施工及交通安全。

從事基礎開挖監測的有：邱志榮所介紹深開挖的七種不同破壞模式[3]，以及這種破壞模式所需的監測儀器及儀器佈設方式。陳斗生介紹高雄東帝士大樓在施工過程中所做的安全監測系統[4]，其中包括樁基礎的承載能力監測、柱位沉陷監測以及對鄰近房屋所作的沉陷觀測。

對於從事隧道工程中所需安全監測的有：徐力平對隧道施工所需計測的數量、位置及測量頻率等事項有詳細的介紹與探討[5]，並提出計測資料不僅可做為安全監測，並可回饋至工程師以為日後設計維修之參考。張吉佐與王建智則介紹潛盾隧道工程中所設置的監

測系統及其功能[6]，其中包括永久水準點、水壓計、沉陷點、土中傾度管、傾斜計、裂縫計、連續壁壁體內傾度管以及應變計。

從事防災監測的有：黃炯憲所介紹的結構物在量測地震反應時所應使用的監測系統[7]，並以宜蘭農工專校教學大樓為例，介紹地震反應監測系統的四大組成要素。謝正倫則介紹利用量測雨量、震動、音頻及衝擊力所設置的土石流預警系統[8]，並能運用數據機與網路將影像、數據、警訊等資料傳遞至特定單位。莊旭楨則針對水門洪災之案例[9]，探討國內防災監測技術概況與缺失，並提出改正方式。

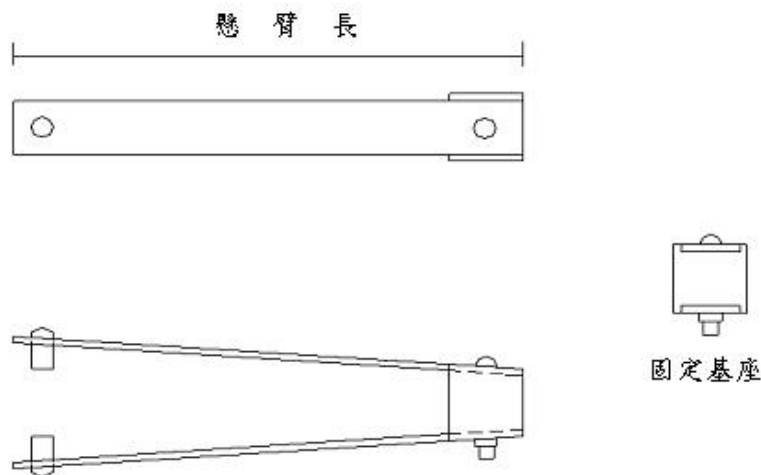
國外學者研究結構監測的主題大致與國內學者相似，其中部份學者為了應付逐年增加但因為預算限制而無法改建的老舊橋梁，因此專注於橋梁結構、特別是橋梁的下部結構進行監測，以增加橋梁使用者之安全[10-16]。也有學者則運用系統識別方法尋找結構的自然頻率，進而依據監測到的結構自然頻率變化，以尋找出結構的健康狀態[16-19,25]。針對近年來為大家所專注的智慧型結構，部分學者從事於智慧結構監測研究，讓結構本身能夠偵測自身的損傷，並能適時的提供警訊[20-25]。此外亦有些學者運用類神經網路或是結構敏感度分析，從事結構監測資料的判定，發展出能夠評判結構損害程度之專家系統[25-28]。不同於國內學者之研究，國外許多研究學者投注心力，專注於由光纖所製造的感測器，並分別運用於不同的結構監測系統[11,29-34]。

由國內外學者所從事的結構監測研究，雖然他們所監測的結構物不盡相同，使用的監測方法也大不相同，然而尋求監測方法之突破與改進，增進結構物使用安全則是一致的，這些研究結果也是本研究執行時參考的依據。

研究方法

本研究的主要工作包括：設計與製作可用於橋梁變形監測的夾式位移計；運用網際網路與分散式資料擷取系統發展橋梁健康監測系統；提供簡易的校正方式，讓健康監測使系統在長期監測過程中確保監測資料的正確性。

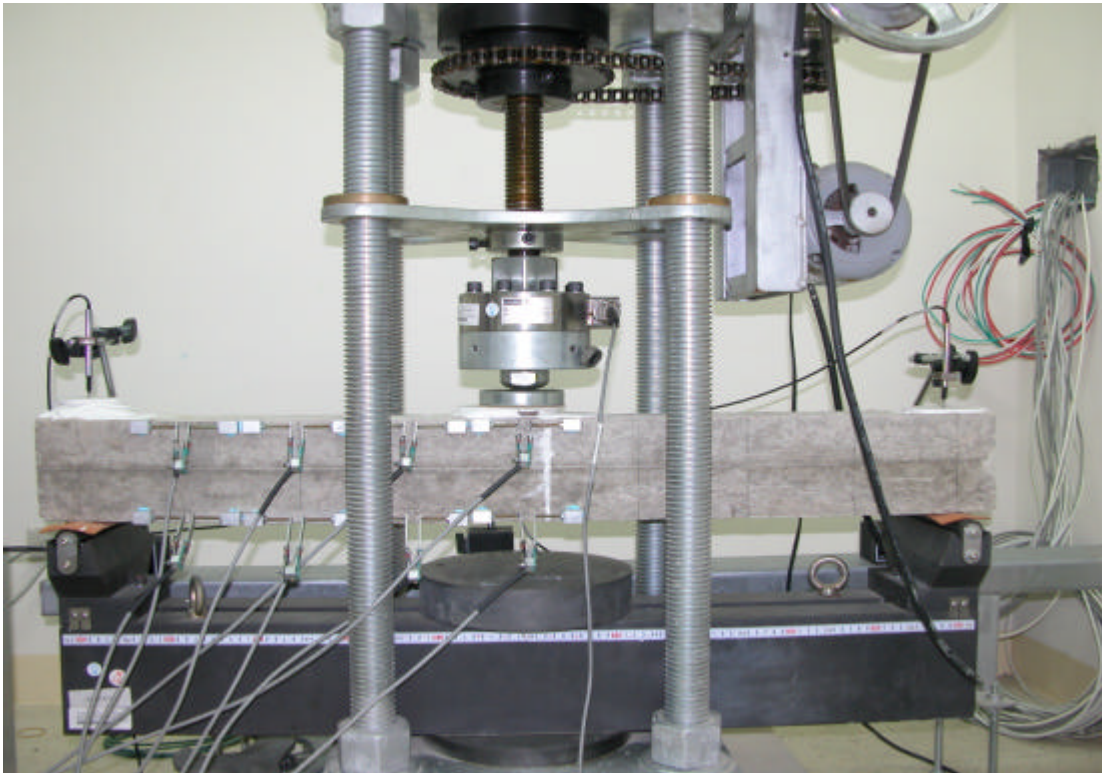
夾式位移計的構造與運作原理可說明如下：如圖一所示，及其基本結構是由兩支懸臂支腳固定於固定基座的兩邊而組成，利用四個應變計分別貼附於支腳上下靠近基座位置，並焊接線路形成惠斯登電阻電橋，當支腳承受外力而張開與閉合產生彎矩變形造成應變計的伸長與縮短，進而改變應變計的電阻值，由電阻值的改變所產生惠斯登電橋的電位差可所顯示夾式位移計兩支支腳間的相對位移。



圖一、 夾式位移計的構造

為了驗證夾式位移計具有量測鋼筋混凝土梁結構變形之能力，本研究運用夾式位移計分別量測 7075 鋁合金梁與鋼筋混凝土梁中間點的垂直位移，量測結果將與 LVDT 位移計量測結果相互比較，以驗證夾式位移計的實用性。三點彎矩實驗設備有包括：手動式載重架、三點彎矩實驗固定座、8 個夾式位移計、3 支 LVDT 位移計，以及自動化資料擷取系統以及

用於整合系統之虛擬儀板程式。實驗配置方式如圖二所示。



圖二、三點彎矩實驗之實驗配置

由於鋼筋混凝土梁在承受彎矩時，混凝土由於無法承受張力而造成開裂，因此鋼筋混凝土梁承受彎矩時各斷面之中性軸位置非固定，因此本研究分別八支夾式位移計分成四組，分別裝設梁在 $L/2$ 、 $3L/8$ 、 $L/4$ 與 $L/8$ 四個斷面之上下緣位置，以量測梁承受彎矩時上下緣的應變，藉由同斷面應變的線性變化之特性，依相似三角形原理可得到中性軸位置，亦同時得到夾式位移計量測位置的曲率 k 半徑。

由小變形理論可知：

$$\frac{1}{k} \cong \frac{d^2y}{dx^2} \quad (1)$$

因此可藉由對三點彎矩實驗中所量測的曲率積分二次，即可獲得鋼筋混凝土梁的垂直變位。從梁中點位置向端點位置方向計算，由夾式位移計器裝設位置得到之四個量測區間平均曲率，由於梁端點所承受的彎矩為零，端點的曲率也必為零，因此從實驗中可以量測到從梁中間點到端點每間隔 $L/8$ 距離的曲率。

在第一次積分時必需分別計算 $L/2$ 至 $3L/8$ 區間的積分、 $L/2$ 至 $L/4$ 區間的積分、 $L/2$ 至 $L/8$ 區間的積分以及 $L/2$ 至 0 區間的積分。從 $L/2$ 位置積分至 $3L/8$ 位置，由於其中僅包含兩個已知曲率，因此只能採用 Trapezoidal rule 計算，使用的方程式如下：

$$\int_0^{\frac{L}{8}} \frac{1}{k} dx = \frac{h}{2} \left[\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right] \quad (2)$$

從 $L/2$ 位置到 $L/4$ 位置的一次積分，由於知道 $L/2$ 位置、 $3L/8$ 位置與 $L/4$ 位置的曲率，因此可採用 Simpson's rule 計算：

$$\int_0^{\frac{L}{4}} \frac{1}{k} dx = \frac{h}{3} \left[\frac{1}{k_1} + 4 \times \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \right] \quad (3)$$

從 L/2 位置到 L/8 位置，由於其中包含 L/2 位置、3L/8 位置、L/4 位置、L/8 位置的四個已知曲率，因此採用 Simpson ' s 3/8 rule 計算：

$$\int_0^{\frac{3L}{8}} \frac{1}{k} dx = \frac{3h}{8} \left[\frac{1}{k_1} + 3 \times \frac{1}{k_2} + 3 \times \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} \right] \quad (4)$$

L/2 到端點區間的一次積分值，使用 L/2 位置、3L/8 位置、L/4 位置、L/8 位置所量測曲率與端點為零的曲率，因此採用 Bode rule 計算，其方程式如下：

$$\int_0^{\frac{L}{2}} \frac{1}{k} dx = \frac{2h}{45} \left[7 \times \frac{1}{k_1} + 32 \times \frac{1}{k_2} + 12 \times \frac{1}{k_3} + 32 \times \frac{1}{k_4} + 7 \times 0 \right] \quad (5)$$

將各點的一次積分計算值與 L/2 所擁有的零，採 Bode rule 做第二次積分，即可求出鋼筋混凝土梁中點位置的垂直變位。意即利用第一次積分所獲得各斷面旋轉角與 L/8 等間距的軸長，以積分方式累加出真實垂直位移。經由實驗對比夾式位移計與 LVDT 量測鋼筋混凝土梁中點位置的垂直變位，以確認夾式位移計量測的可靠性。

除了實驗室驗證，本研究利用桃園縣新屋鄉新濱二號橋從事現地監測試驗，如圖三所示，新濱二號橋位於桃園縣永安漁港旁，此橋共分三跨，跨距皆為30m，每跨擁三支PCI型簡支梁，橋面寬度為7.5m，路肩寬度約40cm。為了驗證夾式位移計作為橋梁健康監測感測器的可用性。本研究分別裝設夾式位移計與混凝土應變規於橋梁北跨西側簡支梁的中間點，用以監測橋梁在承受載重時的位移變形。



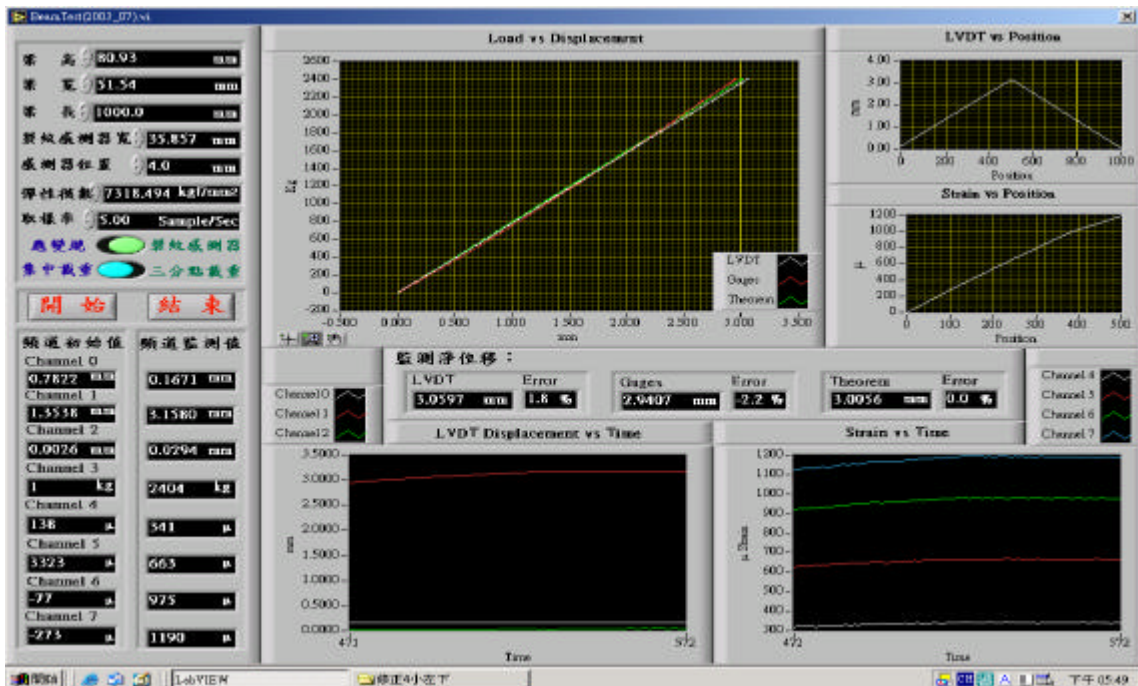
圖三、桃園縣新屋鄉新濱二號橋

為了增加資料擷取系統架設的便利性，但研究運用分散式資料擷取系統架設橋梁健康監測系統，在硬體配置方面，本研究使用的美商國家儀器股份有限公司所生產的 FieldPoint 資料擷取系統，其中包括網際網路介面 (FP-2015)、16 個頻道的應變規類比訊號擷取器 (FP-SG-140) 以及的連結基座 (FP-TB-1)。在軟體配置方面，本研究則運用美商國家儀器股份有限公司所生產的 Labview8.0 擷取 FieldPoint 的結構監測資訊，並將監測資料儲存於 SQL Server 資料庫，Labview8.0 也被用於撰寫繪製橋梁健康監測系統的電子儀表板。

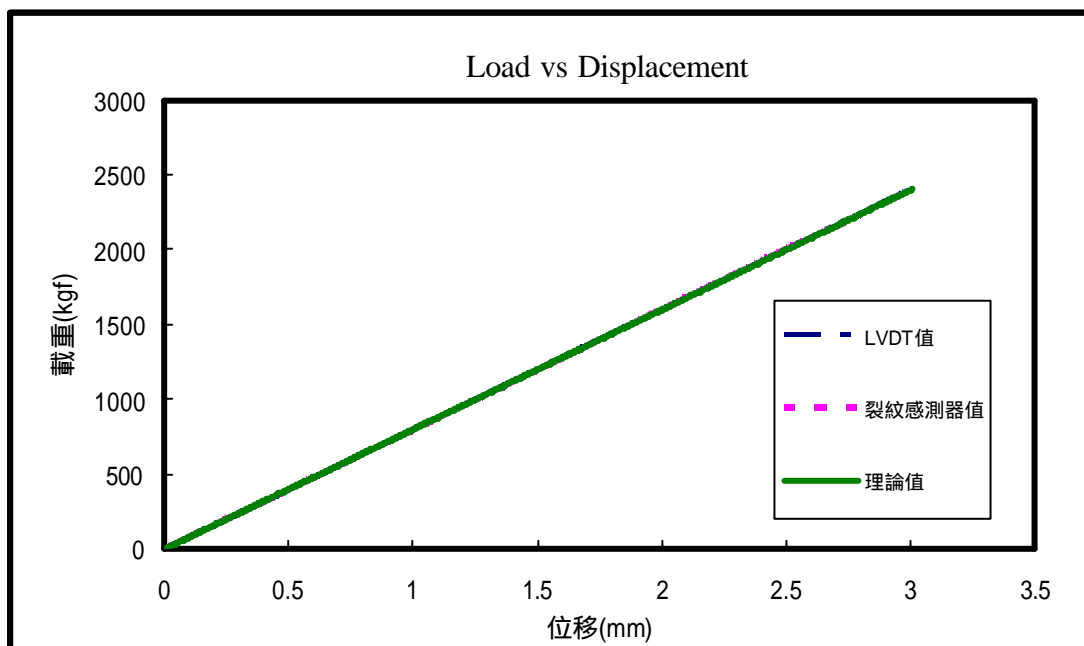
結果與討論

運用夾式位移計分別測 7075 鋁合金梁與鋼筋混凝土梁中間點的垂直位移 [37]，量測結

果將與 LVDT 位移計量測結果相互比較發現運用 LVDT 與夾式位移計量測尺吋為 80 x 52 x 1100 mm 的 7075 鋁合金梁的垂直變位時，所量測的結果幾乎一致，其最大的誤差發生在初始載重，梁中間點的垂直位移極小時，其最大誤差不超過 4%，表示夾式位移計可有效的用於量測梁承受彎矩時的垂直變位，如圖四、五所示。



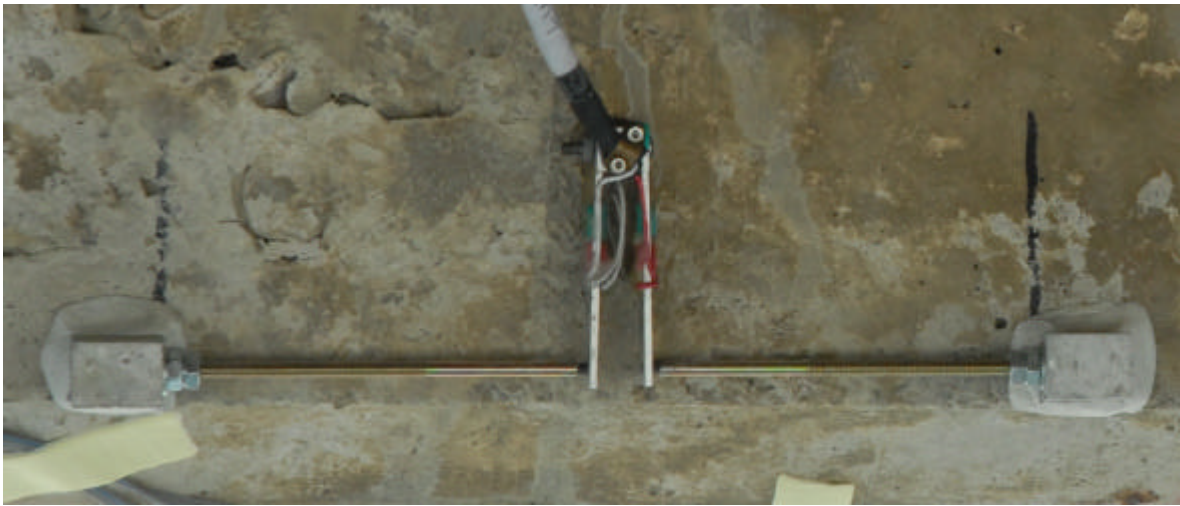
圖四、夾式位移計用於量測鋁梁中間點垂直位移的加載監控情況



圖五、夾式位移計用於量測鋁梁中間點垂直位移的實驗結果

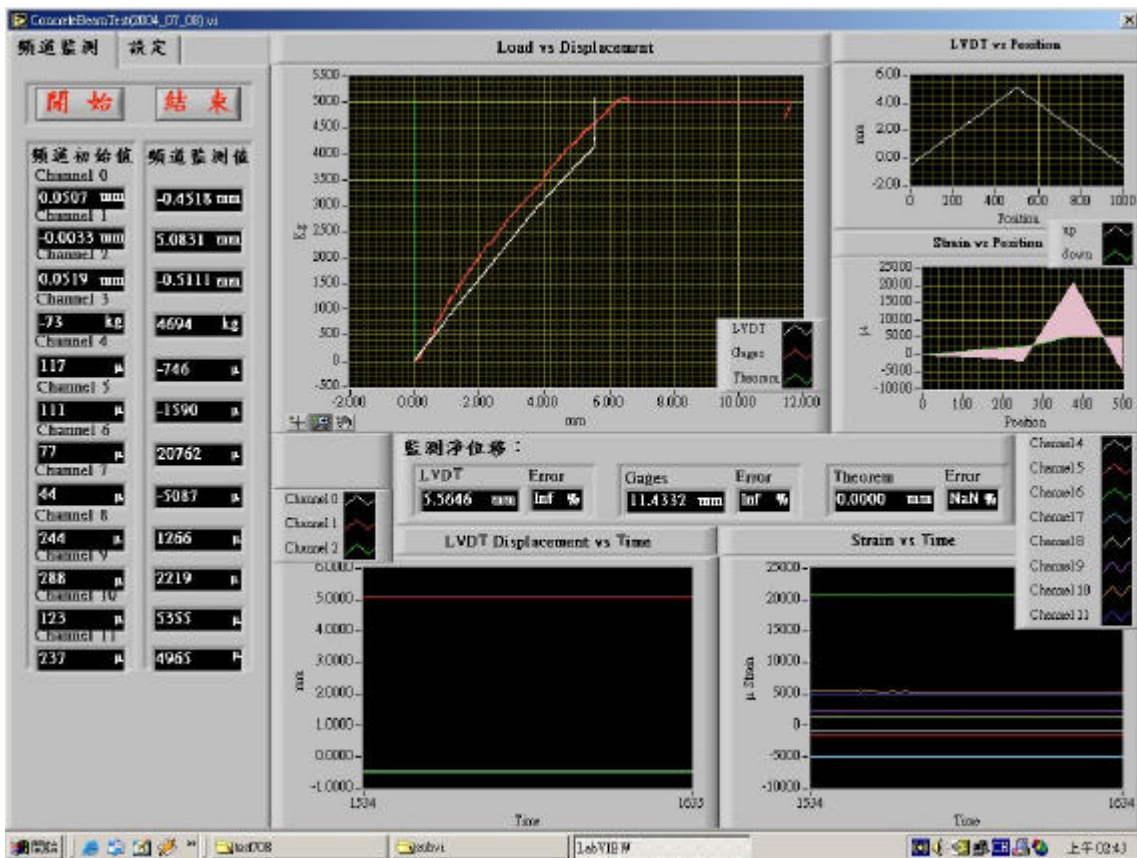
在鋼筋混凝土梁三點彎矩實驗方面[38,39]，由於混凝土破壞時首先會產生許多微小的裂紋來消散外界施加的能量，如果外力持續增加，這些微小的裂紋則會匯集成為較大的裂紋，因此混凝土在承受應力時，應變分佈並不如金屬材料般的平均分配。若利用夾式位移計量測混凝土小範圍內的應變位移，可能會因為有較大張力裂縫存在或未存在量測範圍內，造成量測結果與實際應變的誤差，因此一般量測混凝土變形的應變計的長度遠超過量測金屬材料的應變計，以獲得區域內的平均應變。為了解決此一問題，如圖六所示、本研究所使用的夾式位移計固定基座利用螺桿延伸夾式位移計支腳張開寬度，經由量測這個寬

度的變形位移，再轉換這個位移為應變，以獲得正確的混凝土的平均應變。



圖六、夾式位移計固定基座

在 5 種不同鋼筋比之鋼筋混凝土梁三點彎矩實驗裡，可發現夾式位移計初始量測時所測得的訊號跳動較大，這時應變較小，由於夾式位移計解析度不足未能提供足夠強度的變形量測訊號，當垂直位移大過 0.5 mm 時夾式位移計量測訊號變的較穩定。



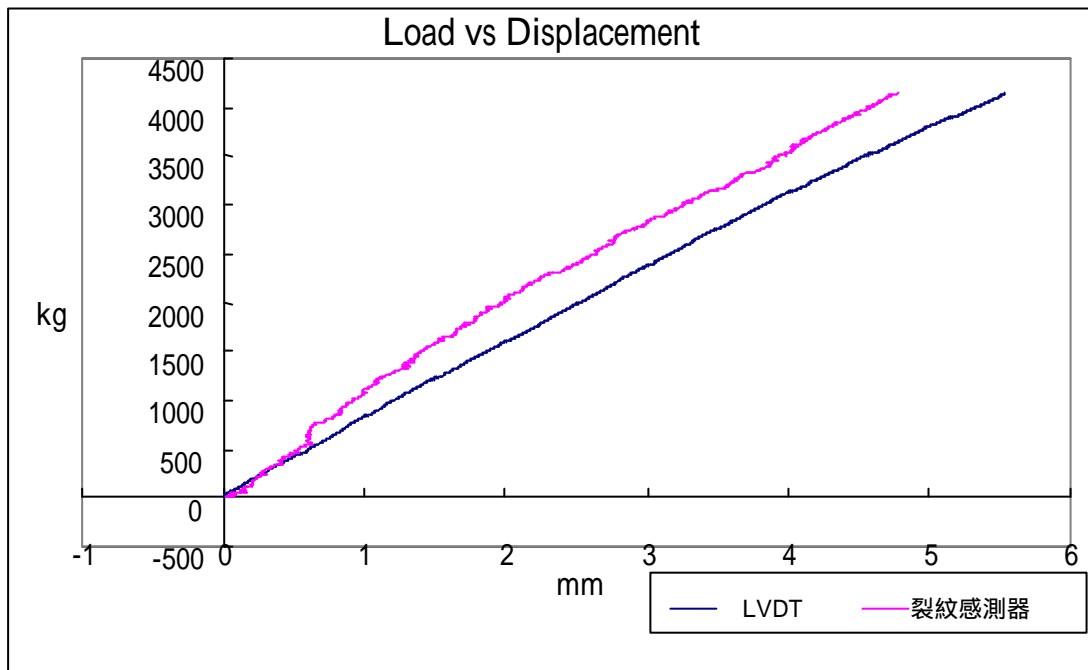
圖七、鋼筋混凝土梁實驗儀表板與實驗結果

如圖七所示、鋼筋混凝土梁試體於施加载重達到 5000kg 左右時，鋼筋混凝土梁破壞，梁中點附近位置的變形量使得夾式位移計右側固定鋁塊脫落，整體結構產生明顯的變形。當載重為 0 到 500kg 時，夾式位移計與 LVDT 量測值相近，之後開始有較大誤差產生。若取載重 1500~4000kg 近似線性區間做比較圖八，可知其斜率值誤差為 5.8%，表示此部份夾式位移計具有和 LVDT 同樣的量測效果。

總括而言，在運用夾式位移計與 LVDT 量測梁中間點垂直變位時，本研究所做的 5 根不同鋼筋比之鋼筋混凝土梁的三點彎矩實驗，其量測誤差，顯示位移量測誤差會隨載重增加而逐漸的增大。其實在載重與位移圖初始線段部份，即位移量測很小時，誤差的來源主要是由於系統裝置的設置誤差所造成。

當鋼筋混凝土梁中間點垂直位移逐漸加大時，混凝土逐漸在壓力區與張力區產生微小裂紋，這些裂紋逐漸加大變成主要裂紋，構成鋼筋混凝土梁變形的的主要原因，但是這些主要裂紋不一定會被夾式位移計捕捉到，因此造成夾式位移計所計算的鋼筋混凝土梁垂直變形小於 LVDT 量測結果，而這個誤差會隨著位移增加而加大。

此外對鋼筋混凝土梁曲率做二次積分，以求得梁中間點的垂直位移，受限於夾式位移計量測斷面的數量，因此在積分過程中亦會累積部分的誤差。此外、當鋼筋混凝土梁接近破壞時，變形位移逐漸加大，因此小變形理論未必能適用，因此本研究在鋼筋混凝土梁三點彎矩實驗中，夾式位移計與 LVDT 量測鋼筋混凝土梁垂直位移誤差高達 12%。



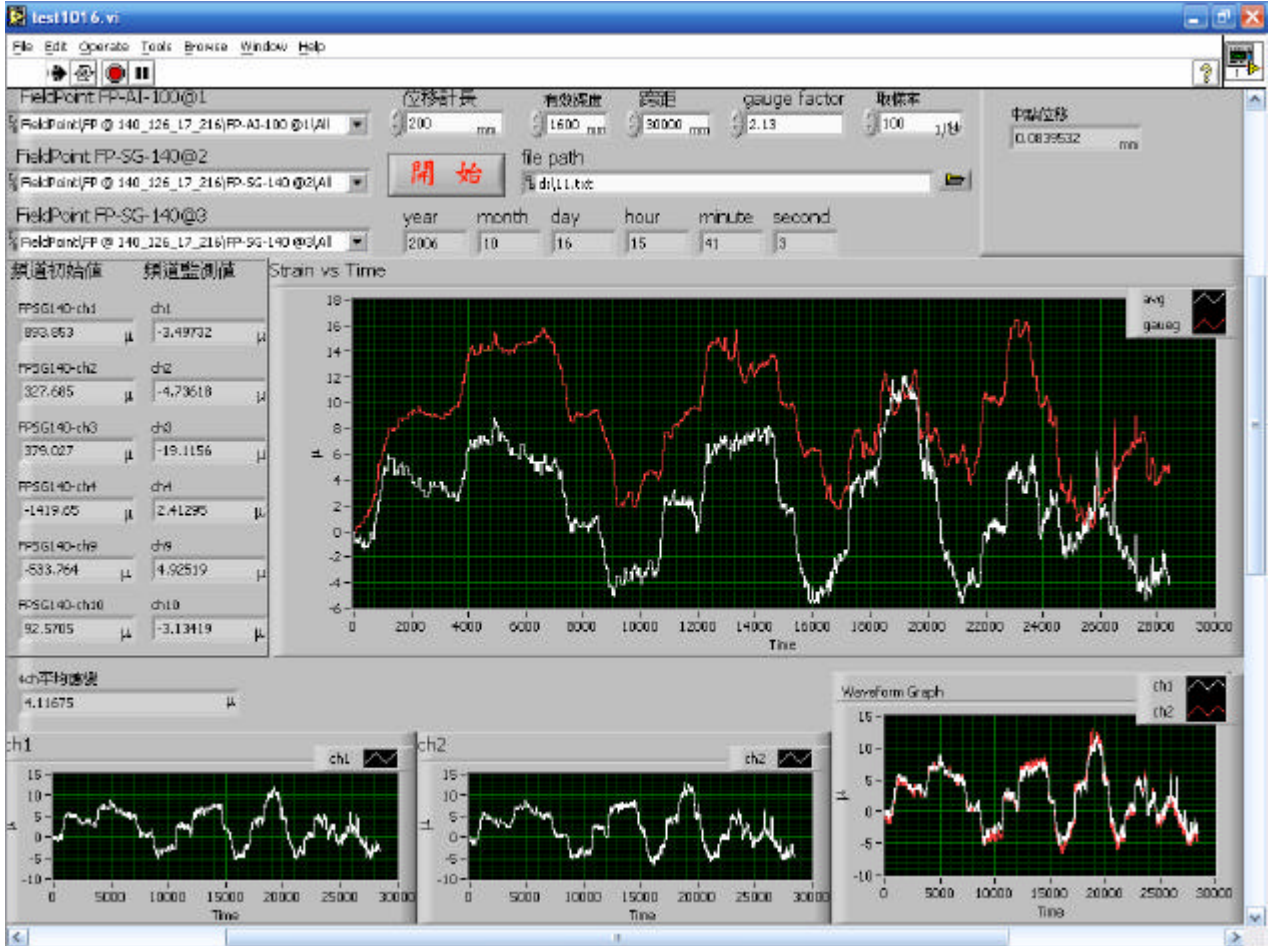
圖八、鋼筋混凝土梁載重與位移圖

桃園縣新屋鄉新濱二號橋現地監測試驗，由於此橋共分三跨，每跨擁三支 PCI 型簡支梁，受限於加載重量的限制，本研究在橋梁北跨西側簡支梁的中間點的底部，分別裝設夾式位移計與混凝土應變規，監測橋梁在承受載重時簡支梁中間點底部的受力應變情形。圖九顯示實驗過程中所使用的數位儀表板，中間較大的圖形顯示區用於繪製監測位置的應變對時間的圖形，其中紅線表示混凝土應變規量測結果，白線則表示兩支夾式位移計所量測的平均應變，數位儀表板下端左側兩張圖形分別顯示兩支夾式位移計量測的應變對時間的圖形，右下角的圖形則將兩支夾式位移計量測結果繪製於同一圖中，以比較兩支夾式位移計量測的差異性，從圖中可發覺兩支夾式位移計量測結果具有相當的一致性，也證明夾式位移計具有一定的可靠性。

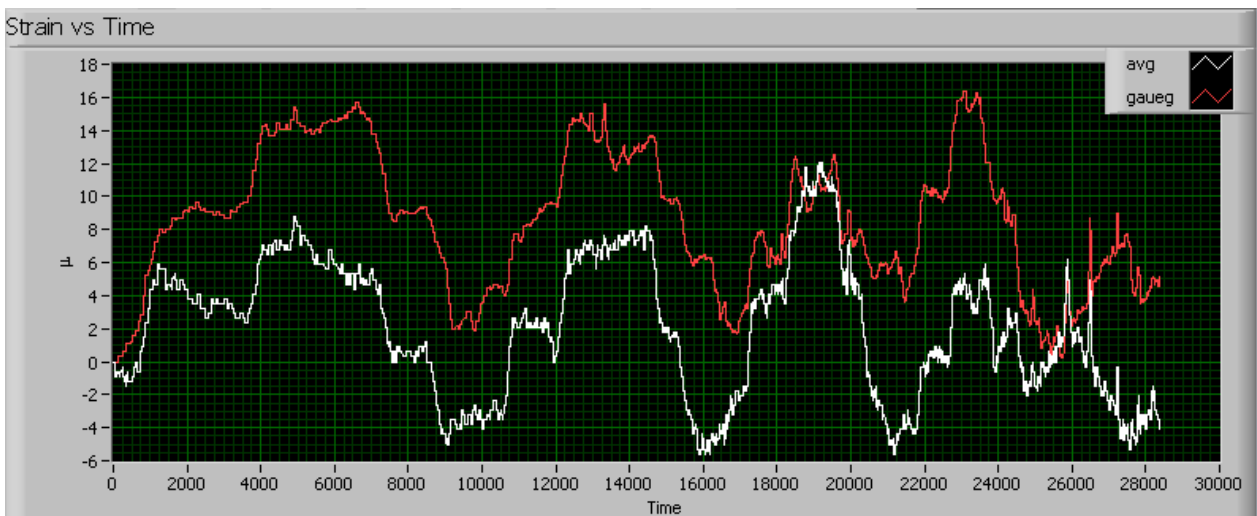
本研究分別運用兩天完成橋梁現地實驗，兩次實驗間隔九天，皆為有陣風的晴天，兩次實驗皆以每秒二十筆資料的取樣率，每次實驗持續將近二十五分鐘。實驗過程中運用兩輛自用小客車，包含駕駛，車重分別為 1300kg 與 1380kg，與橋梁可承受的極限載重相比，這兩部自用小客車的總重量相當微小，因此實驗過程中，車重盡量加載於橋梁北跨西側簡支梁的中間點，橋梁加載順序為 0kg、1300kg、2680kg、1380kg 與 0kg，第一次實驗時依照加載順序重複四次，第二次實驗則重複三次，實驗結果如圖十、圖十一與圖十二所示。

兩次實驗結果可以發現，混凝土應變規與夾式位移計可以非常清楚的偵測橋上自用小

客車加載與卸載的情形，圖形中可以發現幾處急促爬升與下降的波形，是由其他路過的車輛加載所造成。其中在第二次實驗中，第二次加載時，剛好有一部重車駛過，造成一個突升的波形，讓混凝土應變規量測結果提升為 $30.0 \mu \text{ strain}$ ，夾式位移計則升為 $35.3 \mu \text{ strain}$ ，如果僅考慮重車的影響，混凝土應變規與夾式位移計量測的淨提升量分別是 19.9 與 $20.4 \mu \text{ strain}$ ，顯示混凝土應變規與夾式位移計量測結果的一致性。由於本研究製作的夾式位移計解析度低於混凝土應變規，因此在量測結果中，夾式位移計的白色線形不如混凝土應變規的紅色線形平滑，代表夾式位移計擷取了較多的雜訊。



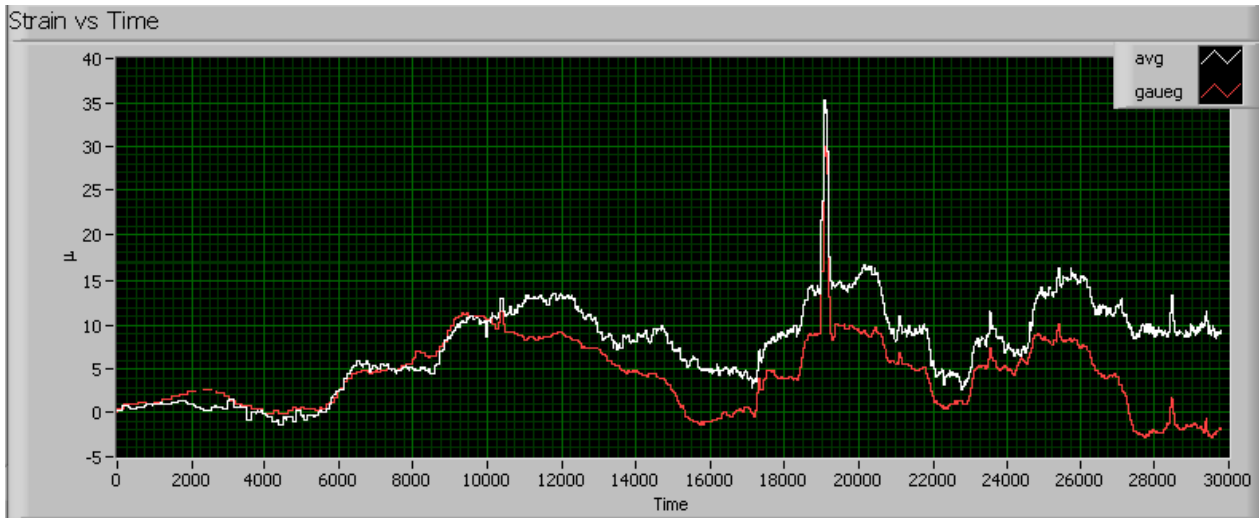
圖九、桃園縣新屋鄉新濱二號橋現地監測試驗所使用的數位儀表板



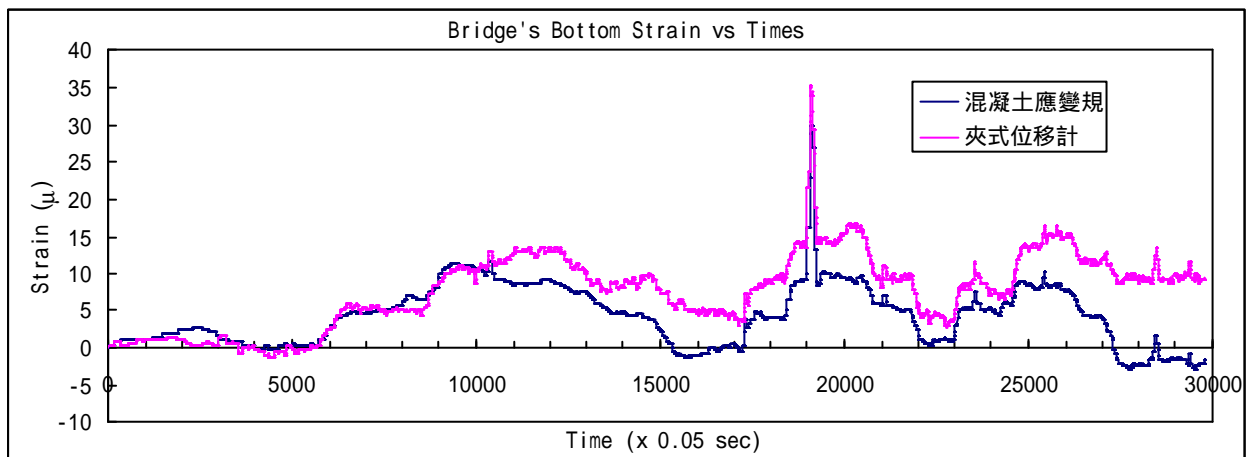
圖十、桃園縣新屋鄉新濱二號橋現地監測試驗第一次實驗結果(數位儀表板顯示結果)

由於本實驗所使用的夾式位移計與混凝土應變規並非裝設在完全一樣的位置，混凝土

應變規裝設於橋梁北跨西側簡支梁的中間點 I 型梁的底部，夾式位移計則裝設於 I 型梁底部的內側邊。由於此橋每跨擁三支 PCI 型簡支梁，因此在加載時車重嘗試加載於橋梁北跨西側簡支梁的中間點，然而只要車子位置稍微向中間偏移，部分載重則為中間簡支梁所承擔，導致量測簡支梁底部應變量測結果偏低。如果車子位置向外偏移，則可能對被量測的簡支梁產生扭力，造成量測訊號一高一低，然而夾式位移計與混凝土應變規量測結果所產生的波形基本上是一致的。



圖十一、桃園縣新屋鄉新濱二號橋現地監測試驗第二次實驗結果(數位儀表板顯示結果)



圖十二、桃園縣新屋鄉新濱二號橋現地監測試驗第二次實驗結果

此外在實驗的過程中可以發覺，混凝土應變規與夾式位移計量測結果皆有漂移的現象。第一次實驗時，夾式位移計向下漂移而混凝土應變規則向上漂移，兩者漂移量約略相等，但夾式位移計漂移量較小。第二次實驗時，夾式位移計向上漂移而混凝土應變規則向下漂移，恰巧與第一次實驗相反，而夾式位移計的漂移量則遠比混凝土應變規高。

兩次實驗中，第一次實驗時夾式位移計的漂移量是 $4 \mu \text{ strain}$ ，第二次實驗時夾式位移計的漂移量是 $9 \mu \text{ strain}$ ，實驗時夾式位移計基座的間距為 200 mm ， $9 \mu \text{ strain}$ 代表夾式位移計量測的位移量為 0.0018 mm ，對設計量測範圍為 $\pm 2 \text{ mm}$ 的夾式位移計而言， 0.0018 mm 的位移量可能逐漸接近夾式位移計的解析度範圍。此外兩次實驗時間雖然不長，第一次實驗時間是下午吹西風，第二次實驗時間是上午吹東北風，因此兩次實驗中溫度變化方向與風向正好相反，因此造成夾式位移計量測資料漂移的原因，是由溫度變化造成線路電阻改變或是風力對線路造成的拉扯牽動夾式位移計，仍須詳細的探究。

雖然本研究所使用的夾式位移計解析度不如混凝土應變規，量測結果更有漂移的現象，然而在考慮到橋梁長期健康監測時，混凝土應變規損壞後重新裝設後，無法回復原來

監測的原點。對於夾式位移計而言，只要裝設具有永久性的固定基座，夾式位移計損壞後重新裝設，仍然能夠回復監測原點。因此夾式位移計不但能夠量測預力混凝土梁中混凝土的實際應變，而非不同載重間的相對應變，而混凝土的實際應變直接關聯到預力混凝土梁中的預力狀況，因此能夠預期預力混凝土梁損壞的時機。如果能提升夾式位移計的解析度與穩定度，再加上夾式位移計造價低廉，稍加改進，應可作為預力混凝土橋梁健康監測的有效工具。

結論與建議

成功地完成此一研究，本研究獲得下列結論：

1. 從各項實驗中可以發覺，夾式位移計與混凝土應變規在量測混凝土應變時具有相當的一致性，夾式位移計具有取代混凝土應變規，作為量測混凝土應變的工具。
2. 目前本研究所使用的夾式位移計解析度不尚如混凝土應變規，量測結果有漂移的現象，宜加以改進。
3. 運用具有永久性的固定基座，夾式位移計能夠量測預力混凝土梁中混凝土的實際應變，不但可以監測橋梁中混凝土受力狀況，亦可作為預力混凝土橋梁中預力損失監測的有效工具。

對於未來學者研究此一問題，本研究提供以下建議：

1. 由於混凝土會產生的應變非常的微小，採用剪力或軸力機製所製造的感測器解析度會比運用彎矩原理所製造的感測器為高，這是未來製作新的感測器的一個思考方向。
2. 未來在設計夾式位移計時，永久性的固定基座必須一併考慮，以增加感測器的穩定度。
3. 感測器量測結果會隨時間漂移，如果無法排除，則必須找出造成漂移的原因與影響方程式，以數值相減的方式排除。

參考文獻

1. 李有豐、施邦築、陳怡智，“土石流危險區內橋梁監測與預警系統之規劃研擬，” 土木技術, Vol. 2, No. 11, pp. 165-177, 1999.
2. 張仕京、陳紹釗、魏錦銘，“西螺、自強大橋橋基保護及補強施工，” 土木技術, Vol. 3, No. 1, pp. 78-91, 2000.
3. 邱志榮，“深開挖破壞模式與監測儀器之佈設，” 土木技術, Vol. 2, No. 9, pp. 120-127, 1999.
4. 陳斗生，“超高大樓基礎設計與施工案例探討，” 土木技術, Vol. 2, No. 8, pp. 64-83, 1999.
5. 徐力平，“隧道計測，” 土木技術, Vol. 2, No. 1, pp. 124-135, 1999.
6. 張吉佐、王建智，“捷運潛盾隧道設計之考量，” 土木技術, Vol. 2, No. 8, pp. 104-114, 1999.
7. 黃炯憲，“結構物之地震反應監測系統簡介，” 土木技術, Vol. 2, No. 4, pp. 42-50, 1999.
8. 謝正倫，“土石流預警系統之現況與展望，” 土木技術, Vol. 1, No. 1, pp. 195-199, 1998.
9. 莊旭楨，“從監測技術看國內防災科技之推展，” 土木技術, Vol. 1, No. 2, pp. 128-135, 1998.
10. Peter C. Chang and S. Chi Liu, “Recent Research in Nondestructive Evaluation of Civil

- Infrastructures,” Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 298-304, 2003.
11. Joan R. Casas and Paulo J. S. Cruz, “Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring”, Journal of Bridge Engineering, Vol. 8, No. 6, pp. 362-373, 2003.
 12. F. Necati Catbas, and A. Emin Aktan, “Condition and Damage Assessment: Issues and Some Promising Indices.” Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 8, pp. 1026-1036, 2002.
 13. Alampalli, S., “Effects of Testing, Analysis, Damage, and Environment on Modal Parameters,” Mechanical System and Signal Processing, Vol. 14, No. 1, pp. 63-74, 2000.
 14. Ponniah, D.A. and Prentice, D. J., “Long Term Monitoring of Fill Pressures in a New Brickwork Arch Bridge,” Construction and Building Materials, Vol. 13, No. 3, pp. 159-167, 1999.
 15. Aktan, A. E., Catbas, F. N., Grimmelsman, K. A., and Tsikos, C. J., “Issues in Infrastructure Health Monitoring for Management,” Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 7, pp. 711-724, 2000.
 16. Maalej, M., Karasaridis, A., Hatzinakos, D., and Pantazopoulou, S. J., “Spectral Analysis of Sensor Data in Civil Engineering Structures,” Computers and Structures, Vol. 70, No. 6, pp. 675-689, 1999.
 17. M. D. Trifunac, S. S. Ivanovic, and M. I. Todorovska, “Apparent Periods of a Building. II: Time-Frequency Analysis,” Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No. 5, pp. 527-537, 2001.
 18. Johnson, E. A., Voulgaris, P. G., and Bergman, L. A., “Methods of System Identification for Monitoring Slowly Time-Varying Structural Systems,” IIS '97 Proceedings, Intelligent Information Systems, pp. 569-573, 1997.
 19. Salawu, O. S., “Detection of Structure Damage Through Changes in Frequency: a Review,” Engineering Structures, Vol. 19, No. 9, pp. 718-723, 1997.
 20. Culshaw, B., Michie, G., Gardiner, P., and McGown, A., “Smart Structures and Applications in Civil Engineering,” Proceedings of the IEEE, Vol. 84, No. 1, pp. 78-86, 1996.
 21. Iordache, O., “Theoretical Frames for Smart Structures,” Materials Science Engineering C : Biomimetic Materials, Sensors and Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 143-148, 1996.
 22. Liu, X., Begg, D. W., “On Simultaneous Optimisation of Smart Structures - Part I: Theory,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 184, No. 1, pp. 15-24, 2000.
 23. Noor, A. K., Venneri, S. L., Paul, D. B., and Hopkins, M. A., “Structures Technology for Future Aerospace Systems,” Computers & Structures, Vol. 74, No. 5, pp. 507-519, 2000.
 24. Sun, M., Li Z., Liu, Q., Tang, Z., and Shen D., “A Study on Thermal Self-Diagnostic and Self-Adaptive Smart Concrete structures,” Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 8, pp. 1251-1253, 2000.
 25. Lee, G. -S., “System Identification and Control of Smart Structures Using Neural Networks,”

26. Mukherjee, A., "Self-Organizing Neural Network for Identification of Natural Modes," Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 2, No. 1, 1997.
27. Soon Ju Kang and Yong Rae Kwon, "Hybird Knowledge-Based Architecture for Building an Intelligent Nondestructive Signal Inspection System," Knowledge-Based System, Vol. 8, No. 1, 1995.
28. Kim, S.-H., "Structural Monitoring System Based on Sensitivity Analysis and a Neural Network," Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 15, No. 4, 2000.
29. McKenzie, I., Jones, R., Marshall, I. H. and Galea, S., "Optical Fiber Sensors for Health Monitoring of Bonded Repair Systems," Composite Structures, Vol. 50, No.4, pp. 405-416, 2000.
30. Leung, C. K. Y., Elvin, N., Olson, N., Morse, T. F., and He, Y. -F., "A Novel Distributed Optical Crack Sensor for Concrete Structures," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 65, No. 2, pp. 133-148, 2000.
31. Hampshire, T. A. and Adeli H., "Monitoring the Behavior of Steel Structures Using Distributed Optical Fiber Sensors," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 53, No. 3, pp. 267-281, 2000.
32. Foote, P. D., Read, I., "Optical Sensors for Aerospace Structural Monitoring," *IEE Colloquium on Optical Fibre Gratings and Their Applications*, pp. 14/1-14-6, 1995.
33. Zha, K., Zheng, X., and Liao, Y., Qi, J., and Wu, P., "Experimental Study of Measuring Strain by Fiber-Optic Sensor Used in Civil Engineering Structures," SPIE, Vol. 2895, pp. 374-383, 1995.
34. Michie, W. C., Thursby, G., Walsh, D., Culshaw, B., and Konstantaki, M., "Distributed Sensing of Physical and Chemical Parameters for Structural Monitoring," *IEE Colloquium on Optical Techniques for Smart Structures and Structural Monitoring (Digest No. 1997/033)*, pp. 3/1-3/9, 1997.
35. Rumbaugh J., Jacobson I. and Booch G., The Unified Modeling Language Reference Manual, Addison Wesley Longman, Inc., Reading, Massachusetts, 1999.
36. Booch G., Rumbaugh J. and Jacobson I., The Unified Modeling Language User Guide, Addison Wesley Longman, Inc., Reading, Massachusett, 1999.
37. 錢俊龍, 「裂紋感測器用於量測簡之梁彎矩變形之研究」, 碩士論文, 中華大學土木工程學系, 新竹, 2002。
38. 周維彬, 「裂紋感測器量測鋼筋混凝土梁結構變形之研究」, 碩士論文, 中華大學土木工程學系, 新竹, 2003。
39. 楊國湘、錢俊龍、周維彬, 「夾式位移計用於量測鋼筋混凝土梁彎矩變形之研究」, 九十四年電子計算機於土木水利工程應用研討會論文集, 成功大學, 台南, 第 424-429 頁, 2005。

計畫成果自評

由於對人民生命財產安全的重視，橋梁健康監測的需求也將逐年增加，在長達數十年的橋梁生命週期中，長期的橋梁健康監測必須考慮下列事項：一、監測系統中的各種設備，從感測器到資料擷取系統皆會隨時間的更替而老舊損壞，因此這些設備必須能夠隨時置換。二、感測器量測的基準不能因感測器的更換而改變。三、為了提升健康監測系統裝設的普遍性，監測系統造價必須具有優越的競爭性。

本研究嘗試運用夾式位移計取代傳統的混凝土應變規，作為量測混凝土應變的工具，其主要的著眼點即是夾式位移計具有可置換性，並可保留原始的混凝土應變監測原點。實驗過程中可以發覺，夾式位移計可以成功的取代混凝土應變規。目前雖然做為長期橋梁健康監測，夾式位移計解析度較混凝土應變規低，量測數值並有漂移的現象，如能加以改進，未來應用範圍將無可限量。因此本研究可謂相當成功的一個研究。