

99-142-2134

MOTC-IOT-97-EDB004

# 交通設施營運維護效能提昇計畫－ 橋梁檢測機械手臂研發進階計畫

著者：曾志煌、陳茂南、巫柏蕙、董基良、鄭銘章、  
馮君平、林志勇、黃維信、黃臣鴻

交通部運輸研究所

中華民國 99 年 12 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

交通設施營運維護效能提昇計畫：橋樑檢測機械手臂研發進階計畫 / 董基良等著. - 初版. — 臺北市：交通部運研所，民 99.12  
面；公分  
ISBN 978-986-02-6316-9(平裝)

1. 交通管理 2. 橋樑工程 3. 檢驗

557.15029

99025152

交通設施營運維護效能提昇計畫—橋梁檢測機械手臂研發進階計畫

著者：曾志煌、陳茂南、巫柏蕙、董基良、鄭銘章、馮君平、林志勇、黃維信、黃臣鴻

出版機關：交通部運輸研究所

地址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網址：[www.iot.gov.tw](http://www.iot.gov.tw) (中文版>圖書服務>本所出版品)

電話：(02)23496789

出版年月：中華民國 99 年 12 月

印刷者：有限責任臺北縣原住民印刷勞動合作社

版(刷)次冊數：初版一刷 80 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價：100 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號・電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

GPN：1009904659

ISBN：978-986-02-6316-9 (平裝)

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

|  |  |                           |  |
|--|--|---------------------------|--|
| 出版品名稱：交通設施營運維護效能提昇計畫－橋梁檢測機械手臂研發進階計畫  |  |                           |  |
| 國際標準書號（或叢刊號）<br>ISBN978-986-02-6316-9(平裝)  | 政府出版品統一編號<br>1009904659  | 運輸研究所出版品編號<br>99-142-2134 | 計畫編號<br>97- EDB004   |
| 本所主辦單位：運輸工程組<br>主管：曾志煌<br>計畫主持人：曾志煌<br>研究人員：陳茂南<br>巫柏蕙<br>聯絡電話：(02)2349-6826<br>傳真號碼：(02)2545-0427   | 合作研究單位：大同大學<br>計畫主持人：董基良教授<br>研究人員：鄭銘章、馮君平、林志勇、黃維信、<br>黃臣鴻<br>地址：臺北市中山區中山北路3段40號<br>聯絡電話：(02)25925252-3466 |                           | 研究期間<br>自 97 年 2 月<br>至 97 年 11 月                            |
| 關鍵詞：橋梁檢測車、機械手臂、攝影檢測  |  |                           |  |
| 摘要： <p>臺灣地區有超過 25,000 座橋梁，平均橋齡接近 20 年，檢測及維修工作將隨橋齡日增，而現有之橋梁檢測車存在價格高昂、數量少、體積大、操作不便之缺失，且將檢測人員運送至橋梁下執行目測工作也有較高之安全風險，本研究之目的即在開發一車載橋梁檢測設備，使有限人力可快速、經濟及安全地進行橋梁檢測。</p> <p>基於本所 96 年開發橋梁檢測雛型設備之經驗及成果，本研究更進一步朝實用、方便及安全的角度修正設計及進行實地檢測。除依起重機安全檢查構造標準計算油壓吊桿結構安全外，並對整體機械手臂結構進行有限元素分析；另進行攝影機同步拍攝及傳輸影像之靜態和動態測試，以檢視攝影品質。最後更實地於翡翠水庫一號橋、澎湖跨海大橋及塔寮坑溪堤岸邊進行驗證測試，確認以機械手臂進行橋梁檢測作業之可行性。</p>   |  |                           |  |
| 出版日期   | 頁數   | 定價                        | 本 出 版 品 取 得 方 式  |
| 99 年 12 月  | 138  | 100                       | 凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。 |
| 機密等級：<br><input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密<br>（解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密，<br><input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密）<br><input checked="" type="checkbox"/> 普通 |  |                           |  |
| 備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。   |  |                           |  |

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS**  
**INSTITUTE OF TRANSPORTATION**  
**MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

|  |  |                                  |  |
|--|--|----------------------------------|--|
| TITLE: Promotion and improvement of transportation asset management and maintenance— Further project of robot arm development for bridge inspection  |  |                                  |  |
| ISBN(OR ISSN)<br>ISBN978-986-02-6316-9   | GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER<br>1009904659 | IOT SERIAL NUMBER<br>99-142-2134 | PROJECT NUMBER<br>97- EDB004   |
| DIVISION: Engineering Division<br>DIVISION DIRECTOR: James C.H. Tseng<br>PRINCIPAL INVESTIGATOR: James C.H. Tseng<br>PROJECT STAFF: Chen, Mao-Nan , Wu, Po-Huei<br>PHONE: (02)2349-6826<br>FAX: (02)2545-0427  |  |                                  | PROJECT PERIOD<br>FROM February 2008<br>TO November 2008   |
| RESEARCH AGENCY: Tatung University<br>PRINCIPAL INVESTIGATOR: Doong, Ji-Liang<br>PROJECT STAFF: Jeng, Ming-Jang, Fung, Chin-Ping, Lin, Chih-Yung, Huang, Wei-Shin, Huang, Cheng-Hung<br>ADDRESS: 40 ChungShan North Road, 3rd Section Taipei 104, R.O.C.<br>PHONE: (02)25925252-3466   |  |                                  |  |
| KEY WORDS: Bridge inspector, Robot arm, Video inspecting   |  |                                  |  |
| ABSTRACT:<br><br><p>The number of bridges in the Taiwan area is more than 26,000, with the average age of bridges being 20. The work load of inspection and maintenance increases with bridge age. The current bridge inspector has the shortcomings of high cost, huge body and difficult operation. Additionally, high risk occurs in the inspection procedure in which a worker is placed underneath the bridge. This project, thus, develops a prototype bridge inspector carried by a vehicle to inspect bridge in a fast, economic and safe way.</p> <p>Based on the experience and results of the 2007 project for developing the prototype bridge inspector, this project further focuses on the modification and field test to become a practicable, convenient, safe bridge inspector. The sectional boom was analyzed following the standard of lifting machine safety inspecting, and the robot's structure is analyzed using the finite element method. This project also examined the photograph quality under static and moving conditions. Field tests were taken on number one bridge in Fei-Tsui Reservoir, Penghu Sea-Crossing Bridge and Ta-Lio-Ken River embankment to validate the bridge inspector.</p> |  |                                  |  |
| DATE OF PUBLICATION<br><br>December 2010   | NUMBER OF PAGES<br><br>138                   | PRICE<br><br>100                 | CLASSIFICATION<br><input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL<br><input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET<br><input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED |
| The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.  |  |                                  |  |



# 目 錄

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| <b>第一章 緒論 .....</b>          | <b>1-1</b> |
| 1.1 計畫背景 .....               | 1-1        |
| 1.2 研究目的 .....               | 1-2        |
| 1.3 研究範圍與對象 .....            | 1-3        |
| 1.4 研究內容與工作項目 .....          | 1-3        |
| <b>第二章 文獻回顧 .....</b>        | <b>2-1</b> |
| 2.1 國外橋梁檢測設備 .....           | 2-1        |
| 2.2 國內檢測車設計 .....            | 2-3        |
| <b>第三章 橋梁檢測機械手臂設計 .....</b>  | <b>3-1</b> |
| 3.1 機械手臂設計 .....             | 3-1        |
| 3.2 橋梁檢測機構平衡分析 .....         | 3-12       |
| 3.3 機械手臂結構強度分析 .....         | 3-14       |
| 3.3.1 油壓吊桿伸臂結構強度分析 .....     | 3-14       |
| 3.3.2 機械手臂整體結構強度有限元素分析 ..... | 3-23       |
| 3.4 橋梁檢測裝置附屬結構強度分析 .....     | 3-32       |
| 3.4.1 銅柱結構強度分析 .....         | 3-32       |
| 3.4.2 聯結栓及車身大梁結構強度分析 .....   | 3-422      |
| 3.5 橋梁檢測機械手臂操作程序 .....       | 3-43       |
| 3.6 攝影機 .....                | 3-466      |
| 3.7 與橋梁管理資訊系統之整合 .....       | 3-47       |
| 3.8 橋檢車設計規格及性能 .....         | 3-48       |
| <b>第四章 橋梁檢測機械手臂實測 .....</b>  | <b>4-1</b> |

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| 4.1 翡翠水庫一號橋實測 .....         | 4-1          |
| 4.2 澎湖跨海大橋實測 .....          | 4-15         |
| 4.3 橋檢車設計修正改進驗證 .....       | 4-21         |
| <b>第五章 結論與建議 .....</b>      | <b>5-1</b>   |
| 5.1 結論 .....                | 5-1          |
| 5.2 建議 .....                | 5-1          |
| <b>參考文獻 .....</b>           | <b>參-1</b>   |
| <b>附錄 1 期中報告審查意見表 .....</b> | <b>附 1-1</b> |
| <b>附錄 2 期末報告審查意見表 .....</b> | <b>附 2-1</b> |
| <b>附錄 3 期末簡報 .....</b>      | <b>附 3-1</b> |

## 表目錄

|   |       |
|---|-------|
| 表 1-1 臺灣地區之橋梁數量統計 .....                       | 1-1   |
| 表 1-2 臺灣地區橋梁橋齡在 40 年以上之橋梁數量統計 .....           | 1-2   |
| 表 1-3 臺灣地區橋梁之平均橋齡統計 .....                     | 1-2   |
| 表 1-4 臺灣地區橋梁依橋面寬度分類之數量統計 .....                | 1-3   |
| 表 3-1 力有機械之 LY3A 油壓吊桿相關規格 .....               | 3-5   |
| 表 3-2 力有機械之 LY3A 油壓相關零配件資料 .....              | 3-5   |
| 表 3-3 第 2 臂及第 3 臂不同斜傾及外轉角度對應之矩形銅柱剪應力及其安全係數    | 3-399 |
| 表 3-4 平均風速及所對應之蒲福風級表 .....                    | 3-40  |
| 表 3-5 橋梁檢測車可停靠距橋邊之距離 .....                    | 3-45  |
| 表 3-6 彩色 22 倍伸縮鏡頭紅外線攝影機(VDI-22X-PTL)之規格 ..... | 3-46  |
| 表 3-7 橋檢車設計規格及性能 .....                        | 3-48  |

## 圖目錄

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 圖 2.1  | MOOG 公司重型裝載設備之橋梁檢測實況 .....                                       | 2-2  |
| 圖 2.2  | Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 小型遙控直升機執行橋梁檢測情形 ..... | 2-3  |
| 圖 2.3  | 營建署主導發展之橋檢車 .....  | 2-4  |
| 圖 2.4  | 營建署主導發展之橋檢車作業實況 .....  | 2-4  |
| 圖 2.5  | 機械手臂組裝後油壓推進測試 .....  | 2-5  |
| 圖 2.6  | 橋梁檢測機械手臂室外測試 .....   | 2-5  |
| 圖 2.7  | 橋梁檢測機械手臂操控過程 CCD 攝影 .....  | 2-6  |
| 圖 3.1  | 機械手臂第 1 臂尺寸圖 .....   | 3-1  |
| 圖 3.2  | 機械手臂第 2 臂尺寸圖 .....   | 3-2  |
| 圖 3.3  | 機械手臂第 3 臂初步設計尺寸圖 .....   | 3-2  |
| 圖 3.4  | 機械手臂第 3 臂減重設計第 1 節尺寸圖 .....                                      | 3-3  |
| 圖 3.5  | 機械手臂第 3 臂減重設計第 2 節尺寸圖 .....                                      | 3-3  |
| 圖 3.6  | 機械手臂第 3 臂減重設計第 3 節尺寸圖 .....                                      | 3-4  |
| 圖 3.7  | 機械手臂第 3 臂減重設計第 4 節尺寸圖 .....                                      | 3-4  |
| 圖 3.8  | 機械手臂第 1 臂油壓吊桿之加工 .....   | 3-6  |
| 圖 3.9  | 檢測車油壓支撐腳之加工 .....  | 3-7  |
| 圖 3.10 | 機械手臂第 1 臂油壓吊桿之測試 .....   | 3-7  |
| 圖 3.11 | 機械手臂第 2 臂之測試 .....   | 3-8  |
| 圖 3.12 | 機械手臂全臂吊重之結構強度及操控(室內測試) .....                                     | 3-9  |
| 圖 3.13 | 機械手臂全臂吊重之結構強度及操控(室外測試) .....                                     | 3-10 |
| 圖 3.14 | 機械手臂全臂吊重之結構強度及操控(河堤邊測試)(1) .....                                 | 3-10 |
| 圖 3.15 | 機械手臂全臂吊重之結構強度及操控(河堤邊測試)(2) .....                                 | 3-11 |
| 圖 3.16 | 機械手臂全臂吊重之結構強度及操控(河堤邊測試)(3) .....                                 | 3-11 |
| 圖 3.17 | 橋梁檢測機械手臂(第 3 臂初步設計)操作平衡安全計算 .....                                | 3-12 |

|   |       |
|---|-------|
| 圖 3.18 橋梁檢測機械手臂(第 3 臂減重設計)操作平衡安全計算.....     | 3-13  |
| 圖 3.19 前方安定度計算規範.....                       | 3-14  |
| 圖 3.20 力有機械吊桿之有限元素模型.....                   | 3-21  |
| 圖 3.21 力有機械吊桿之應力大小及分佈(僅考慮垂直荷重).....         | 3-22  |
| 圖 3.22 力有機械吊桿之應力大小及分佈(考慮垂直、水平及風力荷重).....    | 3-23  |
| 圖 3.23 機械手臂(初始設計)之有限元素模型.....               | 3-24  |
| 圖 3.24 機械手臂各結構件之應力大小及分佈.....                | 3-25  |
| 圖 3.25 機械手臂各結構件之應變大小及分佈.....                | 3-25  |
| 圖 3.26 第 3 臂之應力大小及分佈.....                   | 3-26  |
| 圖 3.27 第 3 臂之應變大小及分佈.....                   | 3-26  |
| 圖 3.28 機械手臂(減重設計)之有限元素模型.....               | 3-27  |
| 圖 3.29 機械手臂(減重設計)各結構件之應力大小及分佈.....          | 3-28  |
| 圖 3.30 機械手臂(減重設計)各結構件之應變大小及分佈.....          | 3-28  |
| 圖 3.31 機械手臂(減重設計)各結構件之應力大小及分佈(考慮受風力作用)..... | 3-29  |
| 圖 3.32 機械手臂(減重設計)各結構件之應變大小及分佈(考慮受風力作用)..... | 3-30  |
| 圖 3.33 機械手臂受各振動頻率動態作用力下的垂直方向位移量.....        | 3-31  |
| 圖 3.34 機械手臂受各振動頻率動態風力下的水平方向位移量.....         | 3-32  |
| 圖 3.35 座標系統轉換示意圖.....                       | 3-33  |
| 圖 3.36 車輛裝載橋梁檢測機構受力示意圖.....                 | 3-42  |
| 圖 3.37 機械手臂操作方式.....                        | 3-455 |
| 圖 3.38 彩色 22 倍伸縮鏡頭紅外線攝影機(VDI-22X-PTL).....  | 3-466 |
| 圖 3.39 橋梁檢測資料庫.....                         | 3-48  |
| 圖 4.1 翡翠水庫一號橋.....                          | 4-1   |
| 圖 4.2 翡翠水庫一號橋護欄.....                        | 4-2   |
| 圖 4.3 路線變更警示措施.....                         | 4-3   |
| 圖 4.4 機械手臂第 3 臂各節接合.....                    | 4-3   |

|   |      |
|---|------|
| 圖 4.5 機械手臂第 2 臂與第 3 臂接合.....            | 4-4  |
| 圖 4.6 機械手臂第 3 臂安裝攝影機.....               | 4-4  |
| 圖 4.7 機械手臂第 3 臂安裝平衡配重塊.....             | 4-5  |
| 圖 4.8 檢測車攝影機接線.....                     | 4-5  |
| 圖 4.9 機械手臂操作.....                       | 4-6  |
| 圖 4.10 機械手臂第 3 臂迴轉.....                 | 4-6  |
| 圖 4.11 機械手臂附載之攝影機深入橋面下.....             | 4-7  |
| 圖 4.12 定點檢測之攝影畫面.....                   | 4-9  |
| 圖 4.13 機械手臂第 2 臂與第 3 臂接合之快速接頭及工作平台..... | 4-10 |
| 圖 4.14 機械手臂第 3 臂附加之小型攝影機.....           | 4-11 |
| 圖 4.15 吊掛第 3 臂末端保持平衡之機構.....            | 4-11 |
| 圖 4.16 機械手臂附載之攝影機.....                  | 4-12 |
| 圖 4.17 機械手臂以 6 公尺長且無平衡配重塊方式操作.....      | 4-12 |
| 圖 4.18 動態檢測之攝影畫面.....                   | 4-14 |
| 圖 4.19 橋檢車於跨海大橋前.....                   | 4-15 |
| 圖 4.20 澎湖跨海大橋橋面.....                    | 4-16 |
| 圖 4.21 執行檢測作業時之車道安全措施.....              | 4-16 |
| 圖 4.22 機械手臂組裝.....                      | 4-17 |
| 圖 4.23 攝影機組裝.....                       | 4-17 |
| 圖 4.24 操控第 3 臂及所承載之攝影機移出橋護欄外.....       | 4-18 |
| 圖 4.25 操控第 3 臂下降至預定深度.....              | 4-18 |
| 圖 4.26 迴轉機械手臂使攝影機深入橋面下進行拍攝工作.....       | 4-19 |
| 圖 4.27 第 2 次測試(1).....                  | 4-20 |
| 圖 4.28 第 2 次測試(2).....                  | 4-20 |
| 圖 4.29 立方體銅柱.....                       | 4-22 |
| 圖 4.30 不附加配重塊進行機械手臂組裝.....              | 4-22 |

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| 圖 4.31 第 3 臂跨越橋護欄並與護欄平行.....      | 4-23 |
| 圖 4.32 配重塊距第 2 臂 1.7 公尺之組裝.....   | 4-24 |
| 圖 4.33 配重塊距第 2 臂 2.7 公尺之組裝.....   | 4-24 |
| 圖 4.34 附加配重塊之第 3 臂跨越橋護欄並與之平行..... | 4-25 |
| 圖 4.35 附加配重塊之第 3 臂下降至預定深度.....    | 4-25 |

# 第一章 緒論

## 1.1 計畫背景

跨越美國密西西比河的明尼蘇達州明尼亞波利 35 號西向州際高速公路(I-35W)大橋於民國 96 年 8 月 1 日傍晚發生斷裂，造成數十人落水失蹤。該橋梁是一條水泥和鋼造的懸臂式大橋，橋齡已有 40 年。這起意外事件再次引起全球各地對橋梁結構安全的高度重視，也警示橋梁管理機關對橋齡高的橋梁應加強定期目視觀測橋梁損壞情形，做好監控、列管之工作。橋梁的腐蝕、劣化多為漸進式，換言之，橋梁斷裂之前應會顯出某些徵兆，因此若能及早發現問題，即可達到預警的效果並解決問題。

臺灣位處地震頻繁地帶，橋梁結構常遭受地震侵襲，而921地震更造成大範圍土石鬆動，其後每次颱風，大量降雨造成的急流夾帶泥砂，不斷衝擊橋梁，更提高了橋梁受損的風險。這些地震或颱風對橋梁造成的破壞，若能及早發現，加以預警或修復，即可大幅降低生命的傷亡並延長橋梁壽命。

依據「臺灣地區橋梁管理資訊系統」97年7月的統計資料，臺灣地區共有橋梁24,102座(不含鐵路橋梁)，平均橋齡18.02年，橋齡在40年以上者達754座，詳細之數量統計列於表1-1至表1-3。由橋齡的統計數字顯示，臺灣地區橋梁已進入老化期，檢測及維修工作將隨橋齡日增，而檢測結果為橋梁是否需進行維修之依據，故檢測之重要程度與工作量較維修更為大且繁重。

表1-1 臺灣地區之橋梁數量統計

| 橋梁管理機關 | 管理橋總數  |
|--------|--------|
| 縣市政府   | 18,005 |
| 公路總局   | 4,027  |
| 高公局    | 2,070  |
| 總計     | 24,102 |



表1-2 臺灣地區橋梁橋齡在40年以上之橋梁數量統計

| 橋梁管理機關 | 橋齡在40年以上之橋數 |
|--------|-------------|
| 縣市政府   | 360         |
| 公路總局   | 394         |
| 高公局    | 0           |
| 總計     | 754         |

表1-3 臺灣地區橋梁之平均橋齡統計

| 橋梁管理機關 | 平均橋齡(年) |
|--------|---------|
| 縣市政府   | 19.43   |
| 公路總局   | 22.36   |
| 高公局    | 12.26   |
| 總計     | 18.02   |

## 1.2 研究目的

橋梁構件會隨著時間累積自然而然發生劣化現象，若再伴隨著交通量增加、重車流量增多，劣化則可能加速加劇。此外，天災及人為事故對橋梁的破壞，往往比自然劣化帶來的傷害更大，因此橋梁維修是無法避免的。然而，無論要發現橋梁的損壞狀況及程度，或是決定維修之方式，都必須以橋梁檢測的結果作為依據。

龐大的檢測工作需要充足的人力，然而目前各橋梁管理單位執行檢測工作之人力卻不足，迫切需要可提高效率及節省人力的檢測輔助設備。目前雖有自國外採購之橋梁檢測車供管理單位使用，然而既有之橋梁檢測車存在價格高昂、數量少、體積大、操作不便之缺失，且檢測方式採行將檢測人員運送至橋梁下執行目測工作之方式也存在有較高之安全風險。因此，如何以有限人力在兼顧效率、經濟、安全的狀況下進行橋梁檢測實為重要課題。

內政部營建署在民國 89 年曾發展一裝載機械手臂之橋梁檢測車<sup>[1]</sup>，以機械手臂裝置 CCD 攝影機傳輸影像執行檢測工作，但此成果面臨了機構龐大之問題。故本所於 96 年開發以小型箱型車為載臺的橋梁機械手臂檢測車，成功改良營建署開發之檢測車機械手臂龐大及以大型貨車為載臺的問題，並初步克服機械手臂機構之收納性，以小型箱型

車承載裝置 CCD 攝影機的機械手臂執行目視檢測工作；而在攝影機方面，亦確實驗證在低照度環境下及機械手臂操作時有良好的檢測品質。因此，延續前述計畫之成果，更進一步朝實用、方便及安全的角度持續改良橋梁檢測機械手臂以供橋梁管理單位使用，即為本研究之目的。

### 1.3 研究範圍與對象

橋梁之橋面寬度不一，若依車道數劃分，有雙向 2 車道、4 車道，甚至於 6 車道及 8 車道不同之橋寬，而車道又可再區分為快車道、機車道和人行道等，且快車道和機車道、人行道寬度不盡相同。依「臺灣地區橋梁管理資訊系統」之統計資料，如表 1-4 所示，橋寬小於 12 公尺之橋數計有 17,359 座，佔橋梁總數之 72.02%，橋寬小於 15 公尺之橋數計有 19,378 座，佔橋梁總數之 80.40%，而橋寬小於 20 公尺之橋數計有 21,927 座，達橋梁總數之 90.98%。

表1-4 臺灣地區橋梁依橋面寬度分類之數量統計

| 橋梁管理機關   | 橋寬小於 12 公尺<br>之橋數 | 橋寬小於 15 公尺<br>之橋數 | 橋寬小於 20 公尺<br>之橋數 |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 縣市政府     | 15,335            | 16,544            | 17,272            |
| 公路總局     | 1,460             | 2,049             | 2,958             |
| 高公局      | 564               | 785               | 1,697             |
| 合計       | 17,359            | 19,378            | 21,927            |
| 佔橋梁總數百分比 | 72.02%            | 80.40 %           | 90.98 %           |

本研究開發之橋梁檢測機械手臂將以小型貨車(3.5 公噸以下，駕駛人可持小型車普通駕照)為機械手臂載臺，採 3 臂式機械手臂，附載 2 個紅外線 CCD 攝影機，拍攝並將影像同步傳輸給檢測人員，以輔助目前檢測人員直接深入橋面下方執行目測的方式。機械手臂檢測範圍以單邊檢測時可達 6~7.5 公尺為目標，來回雙向各進行 1 次，則可檢測橋面寬度 12~15 公尺之橋梁。

### 1.4 研究內容與工作項目

本計畫擬以小型貨車承載機械手臂，同時配置紅外線 CCD 攝影機，用影像處理技術檢測橋梁結構，輔助目前使用舉高車或橋梁檢測車搭載檢測人員執行目視檢測，使橋梁目視檢測得以低成本、高效率的方式來進行。研究計畫內容及工作項目如下：

1. 蒐集國內、外橋梁檢測技術及設備相關文獻，並進行綜整、研析與評估各種技術與設備之組合在機械手臂結合影像處理技術執行檢測上之安全性及可靠性。
2. 以 3.5 噸以下車輛裝載橋梁檢測機構，完成車載雙向 4 車道以上（含）橋梁目視檢測機構與控制軟體之開發。
3. 完成上述開發橋梁目視檢測機構之有限元素結構應力分析，以評估檢測機構之機械手臂的結構安全性。
4. 完成上述開發之橋梁目視檢測機構與本所 96 年度所開發之前端數位影像擷取與後端資料分析軟硬體整合測試，並實地審驗及改善輸出影像品質。
5. 完成上述開發之橋梁目視檢測機構實地測試。

研究架構及流程如圖 1.1 所示。

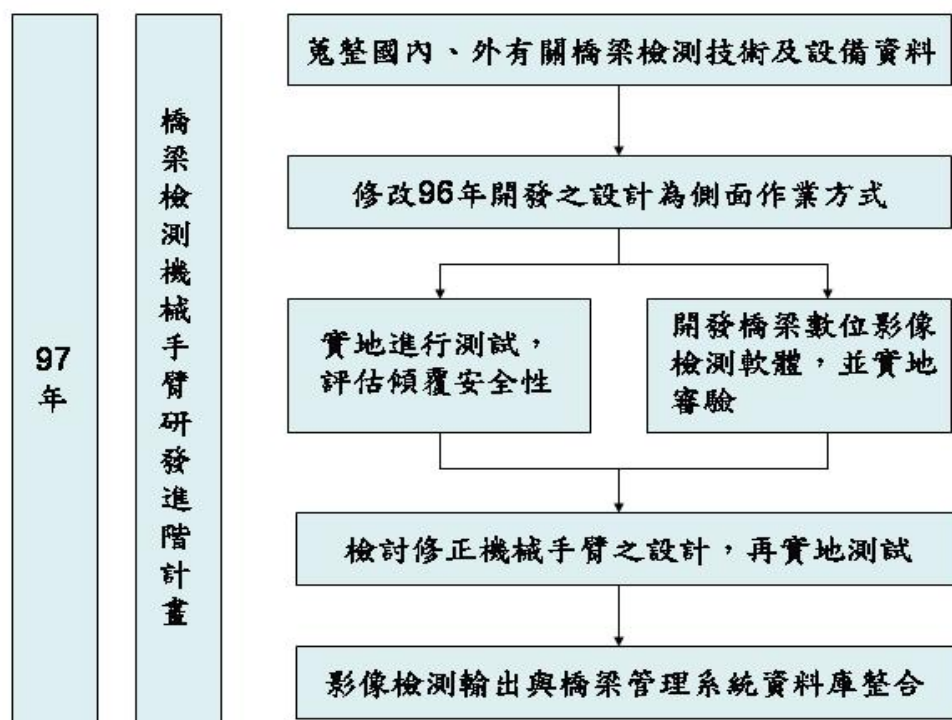


圖 1.1 研究架構及流程

## 第二章 文獻回顧

目前橋梁目視檢測多以不同設備承載檢測人員或影像擷取裝置來執行，相關檢測方法及設備整理如下：

### 2.1 國外橋梁檢測設備

橋梁檢測設備大致可以承載檢測人員或影像擷取裝置來區分，承載檢測人員者多為大型橋梁檢測設備，由多節臂桿組成檢查機械手臂，但其機械手臂部份的設計型式各異，視各開發廠商構想而定，大致上其臂桿均可作 360°旋轉，並可檢查到橋梁的每個角落，而其機械手臂尾端從只容許 1 個人站立之籃筒到可同時站立數人之平臺均有<sup>[2-6]</sup>；而承載影像擷取裝置之檢測設備則多較為小型，其發展是為保障檢測人員之安全，故以攝影機等設備拍攝橋梁輔助人員直接目測，其研發和應用上均在於如何將攝影機送至橋面下以執行拍攝工作<sup>[7-10]</sup>。

大型橋梁檢測設備以 MOOG 公司重型裝載設備<sup>[4]</sup>為代表，其橋梁檢測實況如圖 2.1 所示。交通部公路總局即曾採購 2 部該公司所開發之 MBI200-1.5/S 橋梁檢測車，分別負責臺灣本島東西部橋梁之檢測工作。該設備之最大水平工作範圍是 20 公尺，最大垂直下降深度是 9.5 公尺，平台末端載重為 400 公斤，整車含設備淨重達 32 公噸，在現行交通法規規範下，是以通行證作為運輸依據。在運輸尺寸上，分別為長 12 公尺，寬 2.5 公尺，高 4 公尺。



圖 2.1 MOOG 公司重型裝載設備之橋梁檢測實況

小型橋梁檢測設備方面則呈現不同的檢測思維，其以攝影機輔助並取代檢測人員直接目測，法國 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 的橋梁檢測方案<sup>[8]</sup>就是以小型遙控直升機(Plate-forme Mobile d'Instrumentation, PMI)裝置 CCD 來執行橋梁拍攝工作，操作情形如圖 2.2 所示。以小型遙控直升機執行橋梁檢測不會受地形或橋梁結構之限制，可以深入到橋面下任何位置拍攝，但拍攝時需注意直升機的穩定性，避免晃動，以取得品質較佳的照片，此外，在遙控直升機時若不能目視著直升機，飛行過程中則可能發生意外碰撞，故應特別小心。



圖 2.2 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 小型遙控直升機執行橋梁情形

有關國外所發展及應用之大小型橋梁檢測設備之詳細回顧及評析可參閱本所 96 年度報告<sup>[11]</sup>。

## 2.2 國內檢測車設計

民國 89 年營建署主導<sup>[1]</sup>以油壓及馬達為驅動之機械手臂，配合數位攝影機之影像處理來執行橋梁檢測的研究工作，其作業實況如圖 2.3 及圖 2.4 所示。由於該橋檢車為超過 3.5 噸之中型貨車，駕駛人必須具備大型貨車駕駛執照，且其機械手臂部份淨重近 1 公噸，整體機構亦顯龐大，在操作上仍有困難。此外，由於其 CCD 攝影機不具夜視功能，在橋面下光線不足的作業場所中拍攝之影像品質仍有疑慮。





圖 2.3 營建署主導發展之橋檢車



圖 2.4 營建署主導發展之橋檢車作業實況

由於臺灣地區橋梁數量龐大，寬度 15 公尺以下者佔 80%，國外進口之大型檢測車單價高、數量少、體積大，實際應用時多有障礙，故本所再次推動以機械手臂附加 CCD 攝影機執行橋梁檢測的設備研發計畫。96 年度已完成以小箱型車為機械手臂承載車輛

之檢測車雛型，並陸續完成室內外機械手臂操作測試，如圖 2.5、圖 2.6 所示，同時檢視機械手臂操作時引起之振動對攝影機拍攝影像品質的影響，如圖 2.7 所示，連續之影像擷取品質並未受機械手臂操作振動影響。



圖 2.5 機械手臂組裝後油壓推進測試



圖 2.6 橋梁檢測機械手臂室外測試



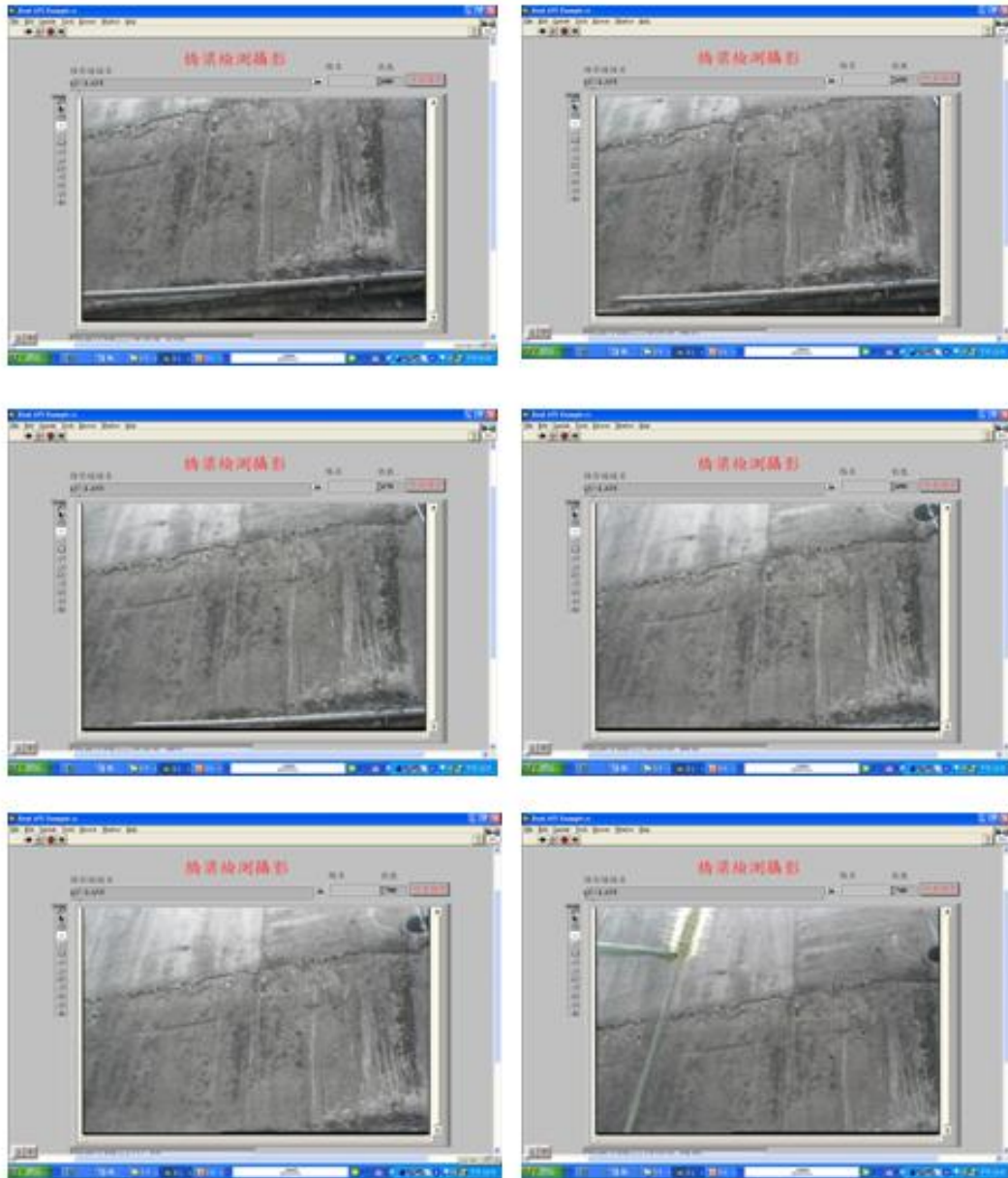


圖 2.7 橋梁檢測機械手臂操控過程 CCD 攝影

### 第三章 橋梁檢測機械手臂設計

#### 3.1 機械手臂設計

本計畫橋梁檢測機械手臂之設計仍採 3 臂式，各臂結構之設計及尺寸如圖 3.1 至圖 3.7 所示。

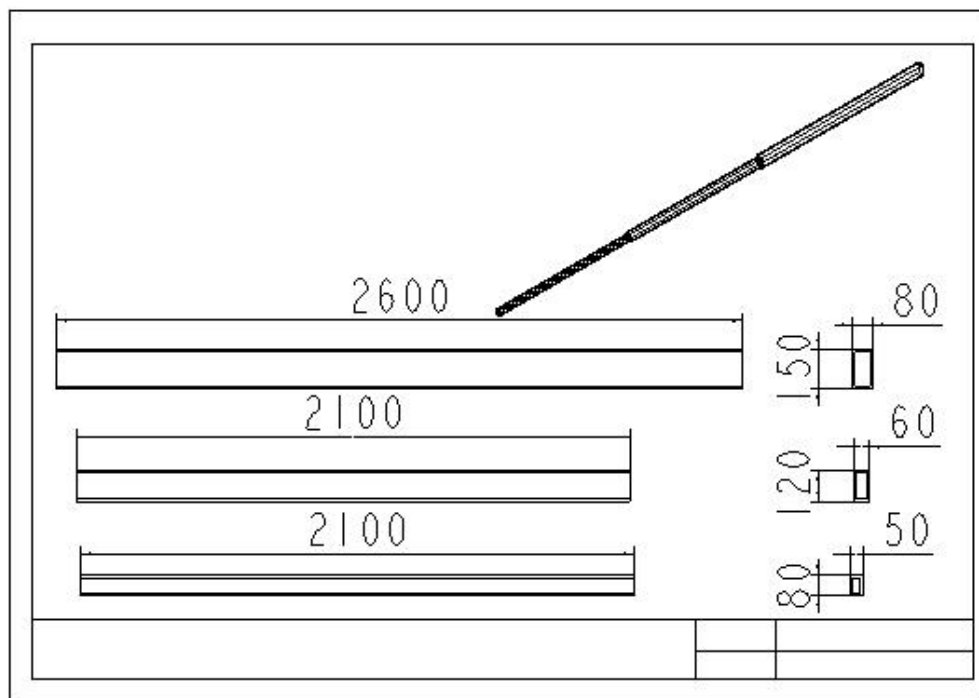


圖 3.1 機械手臂第 1 臂尺寸圖(單位:公釐)

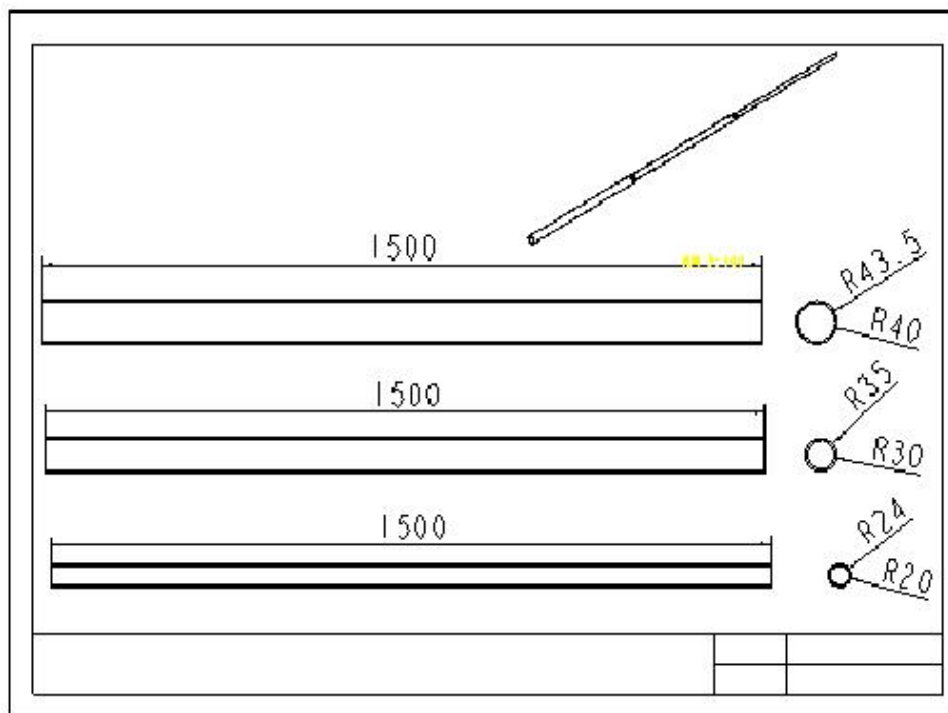


圖 3.2 機械手臂第 2 臂尺寸圖(單位:公釐)

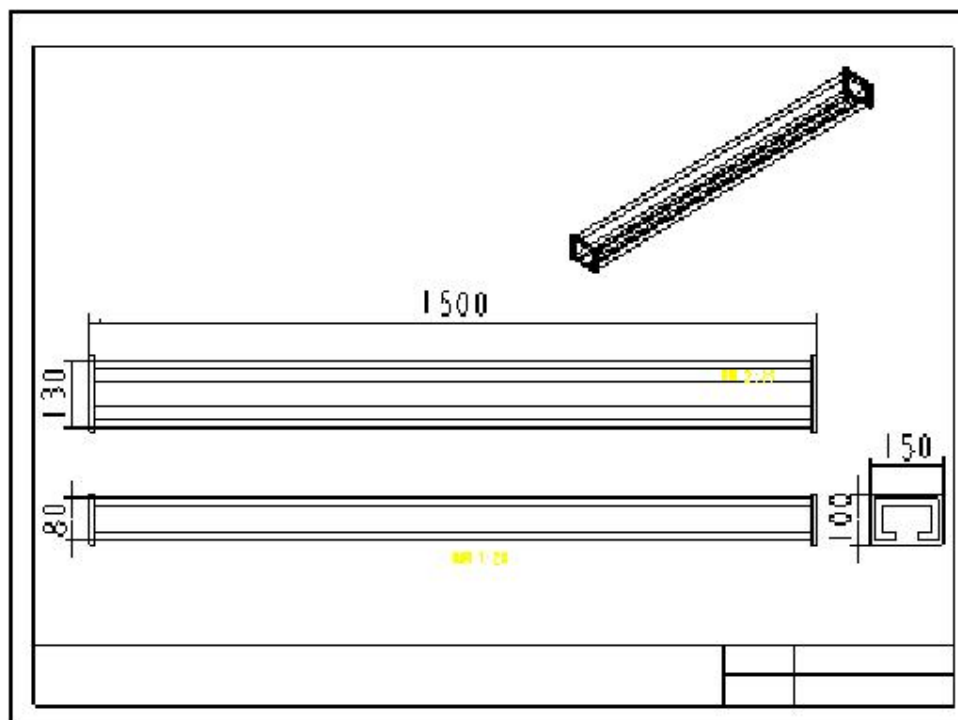


圖 3.3 機械手臂第 3 臂初步設計尺寸圖(單位:公釐)

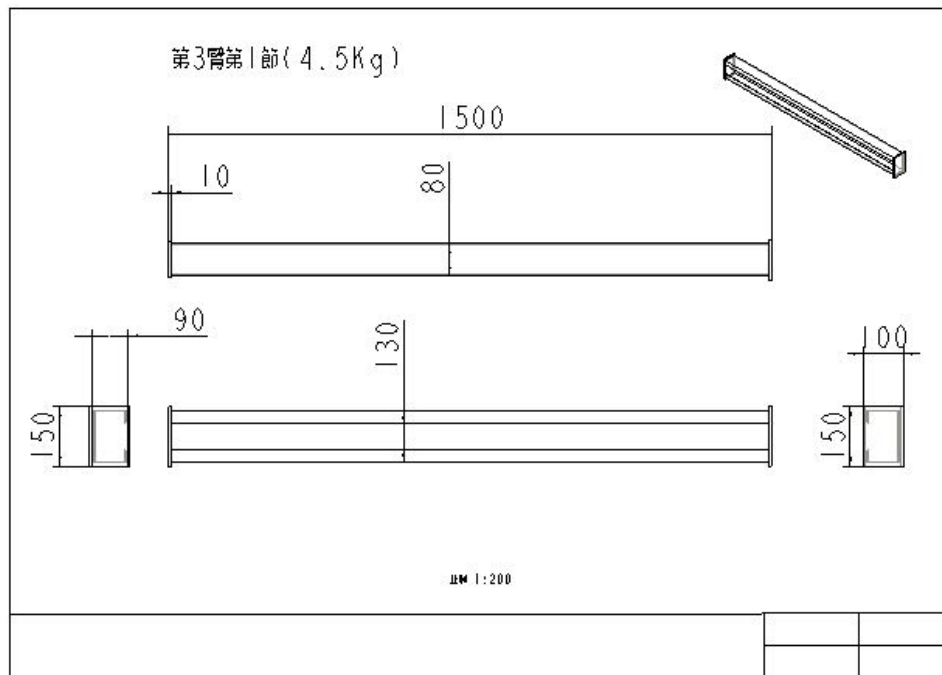


圖 3.4 機械手臂第 3 臂減重設計第 1 節尺寸圖(單位:公釐)

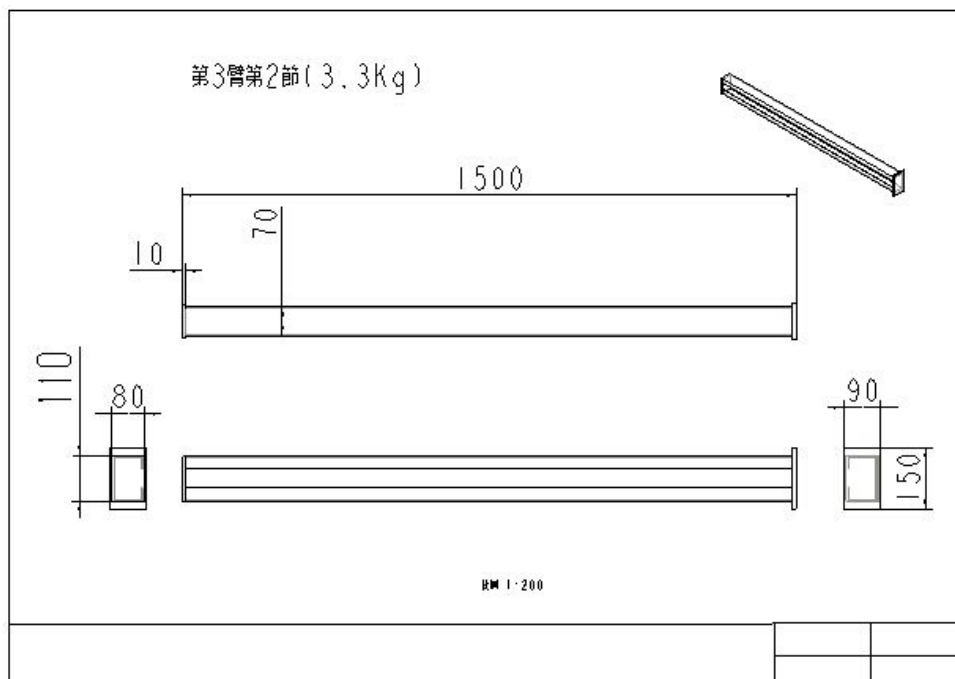


圖 3.5 機械手臂第 3 臂減重設計第 2 節尺寸圖(單位:公釐)

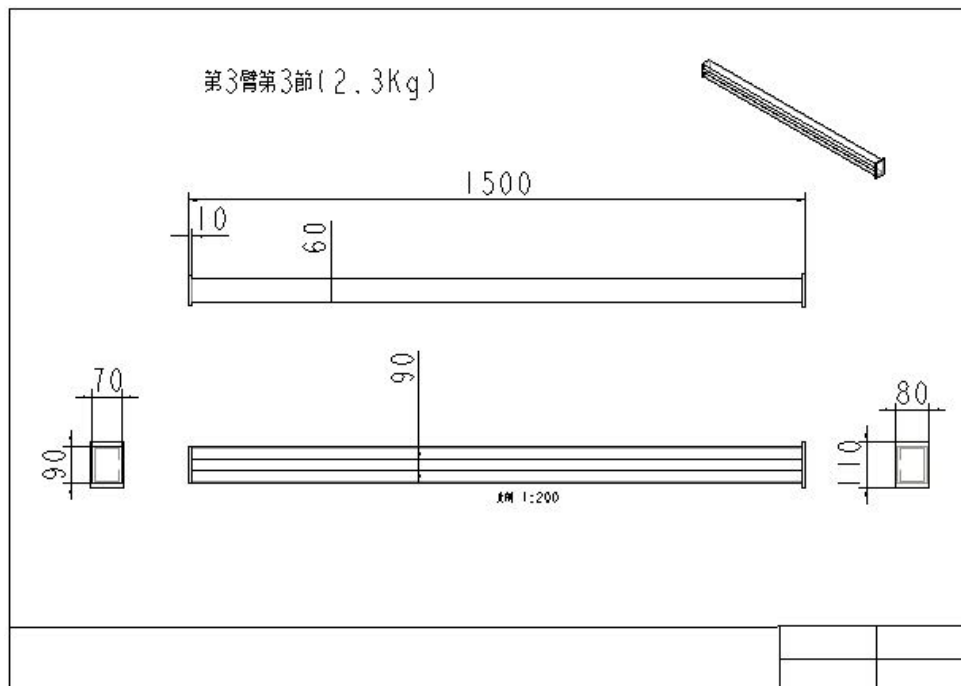


圖 3.6 機械手臂第 3 臂減重設計第 3 節尺寸圖(單位:公釐)

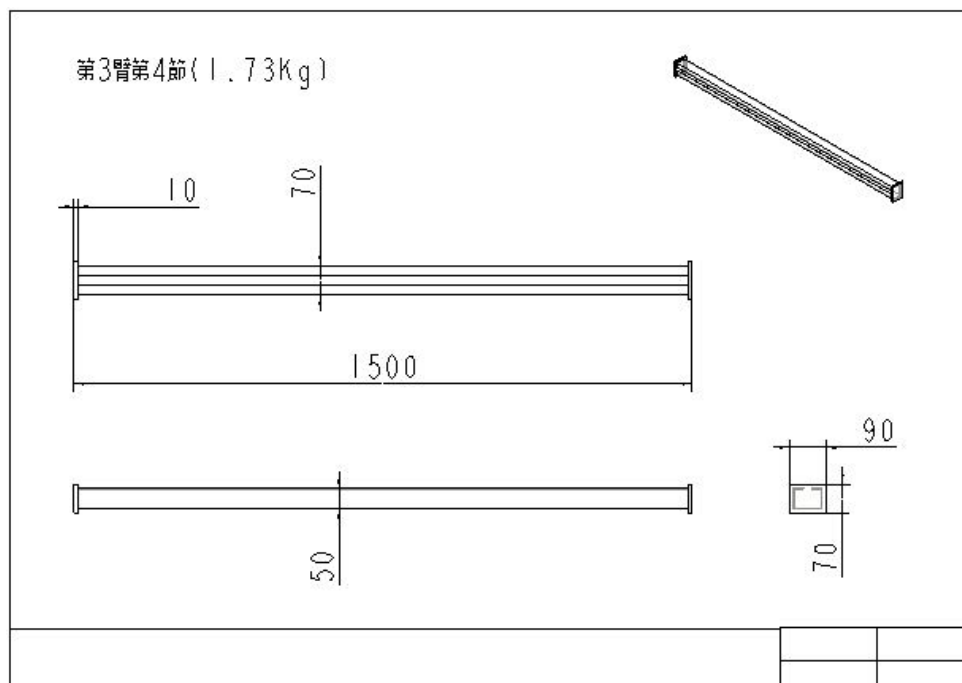


圖 3.7 機械手臂第 3 臂減重設計第 4 節尺寸圖(單位:公釐)

其中，第 1 臂選用國內力有機械之油壓吊桿<sup>[12]</sup>，型號 LY3A，採油壓驅動，全長可達 6.8 公尺並可作 359°旋轉及 76°上仰，而在最大仰角及最大操作範圍(吊桿延伸至最長)時可吊重 200 公斤，另配有 2 隻油壓型支撐腳。型號 LY3A 油壓吊桿相關規格列於表 3-1。

表3-1 力有機械之LY3A油壓吊桿相關規格

| 規格       | 型號     | LY3A |
|----------|--------|------|
| 總重(公斤)   |        | 400  |
| 旋轉角度     |        | 359° |
| 旋轉方式     |        | 油壓   |
| 仰角角度     |        | 76°  |
| 第 1 節    | 長度(公尺) | 2.6  |
|          | 吊重(公斤) | 1300 |
| 第 2 節    | 長度(公尺) | 4.7  |
|          | 吊重(公斤) | 720  |
| 第 3 節    | 長度(公尺) | 6.8  |
|          | 吊重(公斤) | 500  |
| 支撐腳      |        | 油壓型  |
| 立柱高度(公尺) |        | 1.4  |
| 動力源      |        | PTO  |
| 操控方式     |        | 線控   |
| 捲揚機      |        | 電動   |

力有機械之 LY3A 油壓吊桿油壓相關零配件資料列於表 3-2。

表3-2 力有機械之LY3A油壓相關零配件資料

|             | 內徑(公厘) | 外徑(公厘)      | 行程(公厘) |
|-------------|--------|-------------|--------|
| 上下油壓缸       | 75     | 90          | 470    |
| 伸縮油壓缸       | 50     | 60          | 1100   |
| 油箱容量        |        | 6 公升        |        |
| 馬達、幫浦、油箱之壓力 |        | 170 公斤/平方公分 |        |

第 2 臂以 3 節 STPG38 鋼管套接而成，各節鋼管重量自外而內依次為 12.3、13.6、7.4 公斤，鋼管中空部份以鋼索穿過，最內層之鋼管末端與鋼索固定，鋼索則以捲揚機控制收放，達最大下降高度時第 2 臂全長 4.5 公尺。

第 3 臂初步設計時以完全相同之 4 節鋁合金板成型之 C 字型管組裝而成，截面尺寸如圖 3.3 所標示，每節長 1.5 公尺，重 5.5 公斤，各節間以螺絲互鎖固定，C 字型管內再銲接隔板以加強其整體強度。第 3 臂上另有一節垂直臂，以快速螺絲接頭與機械手臂第 2 臂鐵管相接固定。為減少機械手臂第 3 臂自重對第 2 臂所造成的力矩，進而降低第 2 臂所承受的彎曲應力，同時也為增加第 2 臂各節鋼管由鋼索控制時上下收放的順暢性，本研究再針對第 3 臂之初步設計進行減重。減重設計之第 3 臂各節仍以鋁合金板成型之 C 字型管組裝而成，每節長 1.5 公尺，但改採截面尺寸遞減之設計。第 3 臂各節之截面尺寸如圖 3.4 至圖 3.7 所標示，各節重量依次為 4.5 公斤、3.3 公斤、2.3 公斤、1.73 公斤，4 節合計 11.83 公斤。第 3 臂減重設計後之總重較初步設計減少約 10 公斤，所減少之重量能降低對第 2 臂產生的有效彎曲應力並增加操作順暢性。

機械手臂之組裝、加工及初步測試、修改等各項工作，如圖 3.8 至圖 3.16 所示。



圖 3.8 機械手臂第 1 臂油壓吊桿之加工





圖 3.9 檢測車油壓支撐腳之加工



圖 3.10 機械手臂第 1 臂油壓吊桿之測試





圖 3.11 機械手臂第 2 臂之測試



圖 3.12 機械手臂全臂吊重之結構強度及操控(室內測試)





圖 3.13 機械手臂全臂吊重之結構強度及操控(室外測試)



圖 3.14 機械手臂全臂吊重之結構強度及操控(河堤邊測試)(1)





圖 3.15 機械手臂全臂吊重之結構強度及操控(河堤邊測試)(2)



圖 3.16 機械手臂全臂吊重之結構強度及操控(河堤邊測試)(3)

### 3.2 橋梁檢測機構平衡分析

橋梁檢測機械手臂操作時需考慮平衡安全性。本研究於車側執行作業，拍攝橋面下方影像，當第 1 臂完全伸出時，此時將對橋檢車造成最大的傾覆力矩。

(一) 以初步設計之第 3 臂進行分析，如圖 3.17 所示。

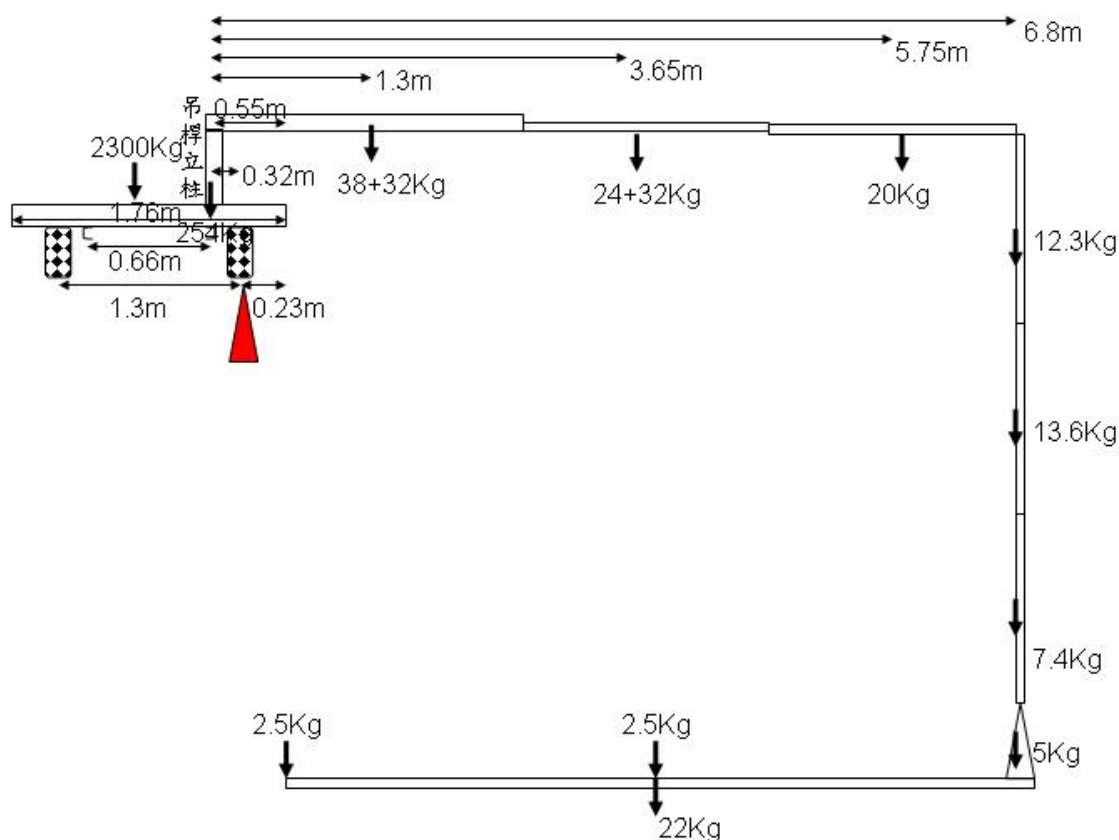


圖 3.17 橋梁檢測機械手臂(第 3 臂初步設計)操作平衡安全計算

機械手臂對橋檢車之最大傾覆力矩：

$$(38+32) \times (1.3-0.32) + (24+32) \times (3.65-0.32) + (20) \times (5.75-0.32) + (12.3+13.6+7.4+5) \times (6.8-0.32) + (22+2.5) \times (6.8-0.32) + (2.5) \times (6.8-0.32) = 68.8 + 186.48 + 108.6 + 248.18 + 158.76 + 16.2 = 787.02$$

橋檢車車重及油壓吊桿機臺重之反傾覆力矩：

$$2300 \times (1.3 \div 2) + 254 \times 0.32 = 1150 + 81.3 = 1231.3$$

$$\text{傾覆安全係數} : 1231.3 \div 787.02 = 1.56$$

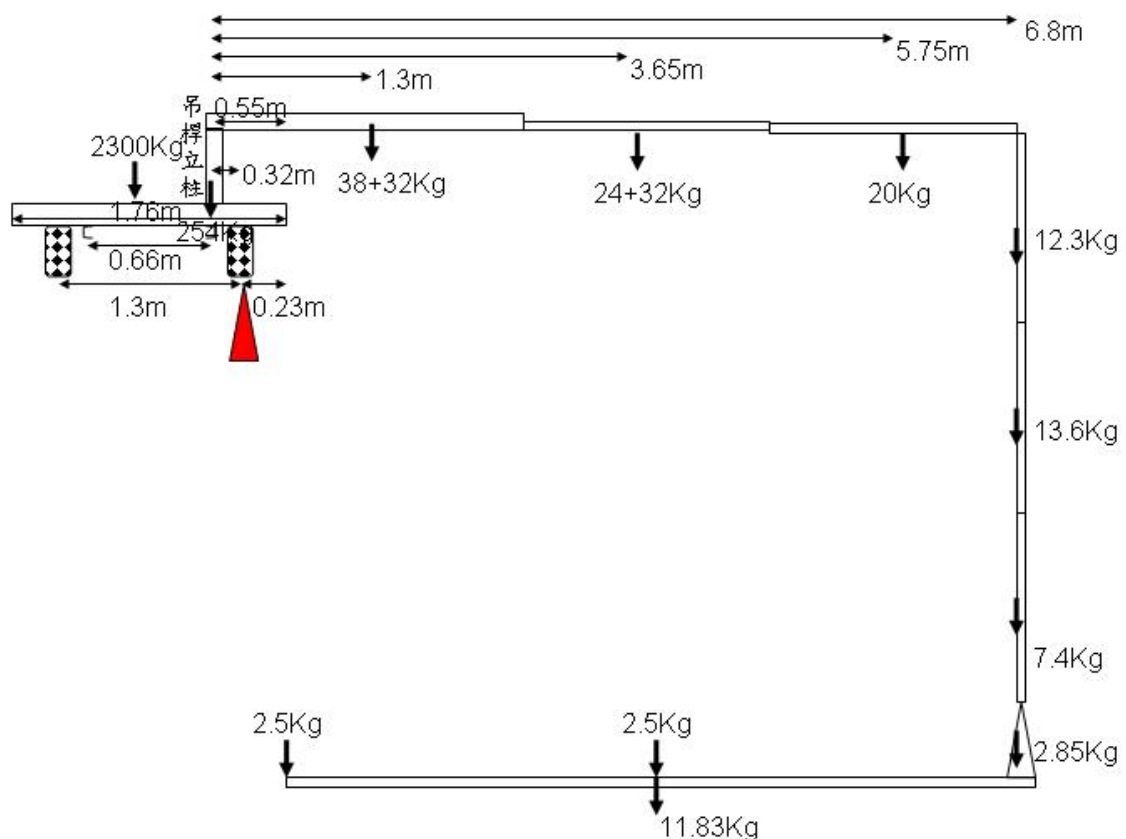


圖 3.18 橋梁檢測機械手臂(第 3 臂減重設計)操作平衡安全計算

(二) 以減重設計後之第 3 臂重量(11.83 公斤)再重新計算，如圖 3.18 所示，則可得第 3 臂減重後在傾覆安全方面改善之情形。

機械手臂對橋檢車之最大傾覆力矩：

$$(38+32) \times (1.3-0.32) + (24+32) \times (3.65-0.32) + (20) \times (5.75-0.32) + (12.3+13.6+7.4+2.85) \times (6.8-0.32) + (11.83+2.5) \times (6.8-0.32) + (2.5) \times (6.8-0.32) = 68.8 + 186.48 + 108.6 + 234.25 + 92.86 + 16.2 = 707.18$$

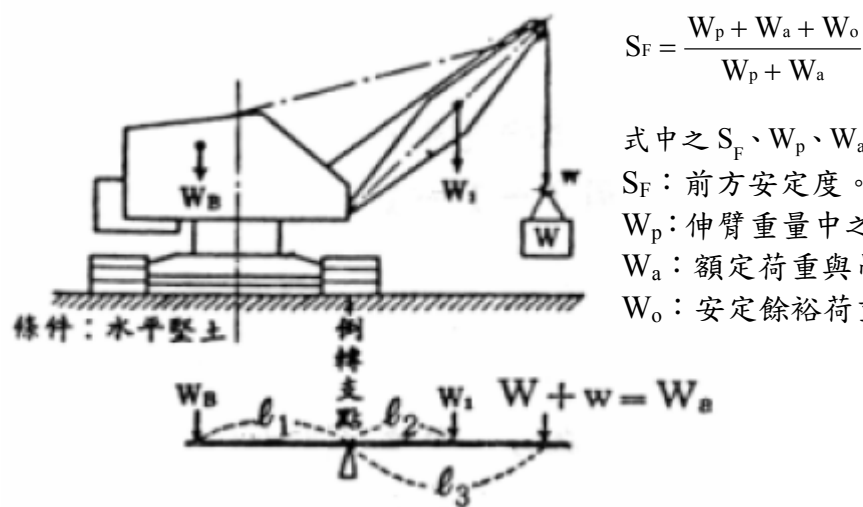
橋檢車車重及油壓吊桿機臺重之反傾覆力矩：

$$2300 \times 0.65 + 254 \times 0.32 = 1150 + 81.3 = 1231.3$$

$$\text{傾覆安全係數} : 1231.3 \div 707.18 = 1.74$$

依行政院勞工委員會 94 年 5 月 12 日勞檢 2 字第 0940024049 號令發布之「移動式起重機安全檢查構造標準」如圖 3.19 所示，第 2 章第 5 節前方安定度之安全係數應大

於 1.15。前述橋檢車之傾覆安全計算所得之安全係數，包括依第 3 臂初步設計所得之安全係數 1.56 及第 3 臂減重設計後所得之安全係數 1.74，均高於規範所要求。



$$S_F = \frac{W_p + W_a + W_o}{W_p + W_a}$$

式中之  $S_F$ 、 $W_p$ 、 $W_a$  及  $W_o$  分別表示下列之值：

$S_F$ ：前方安定度。

$W_p$ ：伸臂重量中之前端等價質量（公噸）。

$W_a$ ：額定荷重與吊具之質量和（公噸）。

$W_o$ ：安定餘裕荷重（公噸）。

圖 3.19 前方安定度計算規範

### 3.3 機械手臂結構強度分析

本研究橋梁檢測機械手臂採 3 臂式設計，第 1 臂直接選用國內力有機械所製造之油壓吊桿，第 2 臂之 3 節圓套管與第 3 臂 C 型管則為另行設計，組裝後進行檢測作業。

對橋梁檢測機械手臂結構之強度分析部份，將先針對油壓吊桿計算結構強度，再對橋梁檢測機械手臂整體結構進行強度分析。油壓吊桿結構強度計算係先依行政院頒定之移動式起重機強度計算基準相關資料進行計算，再以有限元素法分析結構強度以為驗證。橋梁檢測機械手臂整體結構強度分析上，則直接採用有限元素法分析結構，並對第 3 臂之初始設計及減重設計分別探討其對整體結構強度之影響。此外，對橋梁檢測機械手臂操作時，結構受風力之影響亦將予以分析。

#### 3.3.1 油壓吊桿伸臂結構強度分析

依行政院勞工委員會頒定之「危險性機械及設備安全檢查規則」(96.08.09 行政院勞工委員會勞安 2 字第 0960145507 號令修正)，吊升荷重在 3 公噸以上之移動式起重機之製造應檢附強度計算基準相關資料。本研究所開發之橋梁檢測機械手臂第 1 臂選用國內

力有機械製造之油壓吊桿，其在最大仰角及最小操作範圍時之最大吊重為1300公斤，故應不受前述檢查規則所規範。

考慮結構及操作安全性，本研究仍依「移動式起重機安全檢查構造標準」，針對第1臂(卡車型具液壓箱型直伸臂伸縮式之移動式起重機)進行結構強度分析。起重機結構強度計算部份之探討主要重點為箱型伸臂。

以箱型伸臂而言，其伸臂斷面可為長方形及多角形，而其伸臂段數又各有不同，結構強度分析原則依「移動式起重機安全檢查構造標準」規定採應力計算比較法，求取綜合應力與材料容許應力比較，不得超過該標準第2章第2節第5條所規定者。

我國現行與移動式起重機強度計算相關之法令標準如下：

1. 移動式起重機安全檢查構造標準。
2. 中國國家標準；起重機鋼結構部份之計算標準CNS 6426 B1216 (95.2.27修訂)。

第1臂之油壓吊桿箱型伸臂強度計算依相關法令標準，考慮如下：

#### 1. 應力合成考慮

箱型伸臂考慮彎曲力矩、軸向壓縮力，再進而計算合成應力。箱型伸臂所用材料在斷面上所生之應力值，應以「移動式起重機安全檢查構造標準」第2章第3節第11條所列舉荷重所產生之應力值加總計算，且不得超過同標準第2章第2節第5條規定之材料容許應力值。

#### 2. 伸臂荷重加總

依據「移動式起重機安全檢查構造標準」第2章第3節第11條，荷重種類計有垂直動荷重、垂直靜荷重、水平動荷重及風荷重4種。

##### (1) 垂直動荷重

為伸臂所吊升之荷重。力有機械吊桿之垂直動荷重以吊升之額定負重 500 公斤計算。

##### (2) 垂直靜荷重



為起重機箱型伸臂自重。力有機械之 LY3A 油壓吊桿之垂直靜荷重部份，第 1 節伸臂至第 3 節伸臂之重量依次為 38 公斤、24 公斤、20 公斤，而前 2 節伸臂附加油壓缸之重量為各缸 32 公斤。

### (3) 水平動荷重

吊桿之水平動荷重取伸臂自重及吊升之額定荷重兩者加總後之 5%，同時作用於水平方向之值。

### (4) 風荷重

$$W = qCA$$

W：風荷重。單位：牛頓。

q：速度壓。單位：牛頓/平方公尺。

C：風力係數。

A：受風面積。單位：平方公尺。

其中，風速壓  $q=89\sqrt[4]{h}$ ， $h$  為自地面起算之受風面高度(公尺)，高度未滿 16 公尺者，以 16 公尺計。風力係數 C 取 1.6，第 1 節伸臂至第 3 節伸臂之受風面積依次為 0.39 平方公尺、0.252 平方公尺、0.168 平方公尺。計算可得第 1 節伸臂至第 3 節伸臂之風荷重分別為 111.07 牛頓、71.77 牛頓、47.85 牛頓。

此外，若另依風速估計風壓的一般通用公式

$$P=0.5 \times \rho_0 \times v^2$$

其中 P 為風壓(千牛頓/平方公尺)， $\rho_0$  為空氣密度(公斤/立方公尺)， $v$  為風速(公尺/秒)。

由於空氣密度(單位體積的空氣質量， $\rho_0$ )和重度( $\rho$ )的關係為  $\rho=\rho_0 \times g$ 。因此  $\rho_0 = \rho/g$ ，代入前述風壓與風速關係式，得到標準風壓公式：

$$P=0.5 \times \rho v^2 / g$$

在標準狀態下(氣壓為 1013 帕 溫度為 15°C)，空氣密度  $\rho_0=1.25$  (公斤/立方公尺)，空氣重度  $\rho=0.01225$  (千牛頓/立方公尺)，緯度為 45°處的重力加速度  $g=9.8$ (公尺/立方

秒)，得到

$$P=0.5 \times (0.01225) v^2 / 9.8$$
$$= v^2 / 1600 \text{ (千牛頓/平方公尺)}$$

進一步考慮風力係數 C 時

$$P=C \times v^2 / 1600 \text{ (千牛頓/平方公尺)}$$
$$=C \times v^2 / 1.6 \text{ (牛頓/平方公尺)}$$

C 為風力係數，一般取 C=0.8

此式為用風速估計風壓的通用公式。

以起重機吊桿作業時之風速 16 公尺/秒(相當於 7 級風)計算所承受之風壓,  $P=128$  牛頓/立方公尺，則第 1 節伸臂至第 3 節伸臂之風荷重分別為 49.92 牛頓、32.26 牛頓、21.50 牛頓。與前述依法規計算所得相比，以一般通用公式計算所得大約是依法規計算所得的二分之一，其間之差異應在法規的計算公式是以受風面高度 16 公尺所受之風速風壓來推估計算，有別於一般通用公式以實際風速來計算。

### 3. 彎曲應力

彎曲應力是箱型伸臂承受各種荷重所致的彎曲力矩而產生的應力，彎曲力矩計有垂直彎曲力矩及水平彎曲力矩兩種。垂直彎曲力矩係以垂直靜荷重及垂直動荷重作用於計算斷面計之，水平彎曲力矩則係以水平動荷重及風荷重作用於計算斷面計之，即分別以荷重乘以作用點與計算斷面間之垂直距離。

箱型伸臂承受各種彎曲力矩將產生與計算斷面垂直之應力，稱之為正應力(Normal stress)。

$$\sigma_N = \sigma_v + \sigma_h$$

其中，

$\sigma_N$  = 正應力

$\sigma_v$  = 垂直荷重 ( $P_v$ ) 所產生之彎曲應力  $= M_v / Z_x$

$\sigma_h$  = 水平荷重 ( $P_h$ ) 所產生之彎曲應力  $= M_h / Z_y$

$M_v$  = 垂直荷重對計算斷面所生之彎曲力矩

$M_h$  = 水平荷重對計算斷面所生之彎曲力矩

$Z_x$  = 對於X 軸之斷面係數

$Z_y$  = 對於Y 軸之斷面係數

(1) 垂直荷重所產生之垂直彎曲應力

以力有機械吊桿之油壓吊桿規格所定之仰角 $76^\circ$ 舉升第3節臂最大吊重500公斤時，  
伸臂第1節所承受之垂直荷重對計算斷面所生之彎曲力矩為

$$[(38+32) \times 9.8 \times 1.3 \times \cos 76^\circ] + [(24+32) \times 9.8 \times 3.65 \times \cos 76^\circ] + [(20) \times 9.8 \times 5.75 \times \cos 76^\circ] \\ + [(500) \times 9.8 \times 6.8 \times \cos 76^\circ] = 214.93 + 482.75 + 271.61 + 8030.12 = 8999.41 \text{ 牛頓-公尺}$$

伸臂第1節對於X 軸之斷面係數為

$$[0.08 \times (0.15)^3 - 0.072 \times (0.142)^3] / 12 \div (0.15/2) = 7.09 \times 10^{-5}$$

伸臂第1節受垂直荷重所產生之垂直彎曲應力

$$8999.41 \div (7.09 \times 10^{-5}) = 126.93 \times 10^6 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

(2) 水平荷重及風荷重所產生之水平彎曲應力

以力有機械吊桿之油壓吊桿規格所定之仰角 $76^\circ$ 舉升第3節臂最大吊重500公斤時，  
伸臂第1節所承受之水平荷重對計算斷面所生之彎曲力矩為

$$\{[(38+32) \times 9.8 \times 1.3 \times \cos 76^\circ] + [(24+32) \times 9.8 \times 3.65 \times \cos 76^\circ] + [(20) \times 9.8 \times 5.75 \times \cos 76^\circ] \\ + [(500) \times 9.8 \times 6.8 \times \cos 76^\circ]\} \times 0.05 = 10.73 + 24.13 + 13.58 + 401.51 = 449.95 \text{ 牛頓-公尺}$$

伸臂第1節對於Y 軸之斷面係數為

$$[0.15 \times (0.08)^3 - 0.142 \times (0.072)^3] / 12 \div (0.08/2) = 4.96 \times 10^{-5}$$

伸臂第1節受水平荷重所產生之彎曲應力

$$449.95 \div (4.96 \times 10^{-5}) = 9.07 \times 10^6 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

以力有機械吊桿之油壓吊桿規格所定之仰角 $76^\circ$ 舉升第3節臂最大吊重500公斤時，  
伸臂第1節所承受之風荷重對計算斷面所生之彎曲力矩為

$$[103.58 \times 1.3 \times \cos 76^\circ] + [66.93 \times 3.65 \times \cos 76^\circ] + [44.62 \times 5.75 \times \cos 76^\circ] = \\ 32.58 + 55.10 + 62.07 = 149.75 \text{ 牛頓-公尺}$$

伸臂第1節對於Y 軸之斷面係數為

$$[0.15 \times (0.08)^3 - 0.142 \times (0.072)^3] / 12 \div (0.08/2) = 4.96 \times 10^{-5}$$

伸臂第1節受風荷重所產生之彎曲應力

$$149.75 \div (4.96 \times 10^{-5}) = 3.02 \times 10^6 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

最後，伸臂第1節受水平荷重及風荷重所產生之水平彎曲應力

$$9.07 \times 10^6 + 3.02 \times 10^6 = 12.09 \times 10^6 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

#### 4. 壓縮應力

壓縮應力是伸臂受各種荷重所發生之軸向壓縮荷重而產生。軸向壓縮荷重亦稱壓縮力，於吊桿舉升時，垂直靜荷重及垂直動荷重對於伸臂均發生軸向壓縮力。

$$\text{壓縮應力 } \sigma_c = P / A$$

P=壓縮荷重

A=計算斷面積

伸臂第1節受軸向壓縮荷重所發生之壓縮應力

$$[(38+32) \times 9.8 \times \sin 76^\circ + (24+32) \times 9.8 \times \sin 76^\circ + (20) \times 9.8 \times \sin 76^\circ + (500) \times 9.8 \times \sin 76^\circ] / [(0.15+0.08) \times 2 \times 0.004] = (665.42+532.34+190.12+4753.00) / 0.00184 = 3.337 \times 10^6 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

#### 5. 材料容許應力

依「移動式起重機安全檢查構造標準」第2章第2節第5條，材料容許應力計算如下：

$$\sigma_{ta} = \sigma_a$$

$$\sigma_{bat} = \sigma_a$$

$$\sigma_{ca} = \sigma_a / 1.15$$

$$\sigma_{da} = 1.42 \sigma_a$$

$$\tau = \sigma_a / \sqrt{3}$$

其中， $\sigma_a$ 、 $\sigma_{ta}$ 、 $\sigma_{ba}$ 、 $\sigma_{ca}$ 、 $\sigma_{da}$  及  $\tau$ ，分別代表下列意義。

$\sigma_a$ ：降伏強度除以 1.5

$\sigma_{ta}$ ：容許抗拉應力

$\sigma_{bat}$ ：容許抗拉彎曲應力

$\sigma_{ca}$ ：容許抗壓應力

$\tau$ ：容許抗剪應力

$\sigma_{da}$ ：容許承壓應力

力有機械吊桿以結構鋼 SS400 材料性質計算，降伏強度215百萬帕， $\sigma_a = 215/1.5 = 143.3$ 百萬帕。

$$\sigma_{ta} = \sigma_a = 143.3 \text{ 百萬帕}$$

$$\sigma_{bat} = \sigma_a = 143.3 \text{ 百萬帕}$$

$$\sigma_{ca} = \sigma_a / 1.15 = 143.3 / 1.15 = 124.6 \text{ 百萬帕}$$

$$\sigma_{da} = 1.42\sigma_a = 1.42 \times 143.3 = 203.486 \text{ 百萬帕}$$

$$\tau = \sigma_a / \sqrt{3} = 143.3 / \sqrt{3} = 82.73 \text{ 百萬帕}$$

#### 伸臂第1節受拉應力

$126.93 + 12.09 = 139.02$ 百萬帕 < 容許抗拉應力( $\sigma_{ta}$ ) 或容許抗拉彎曲應力( $\sigma_{bat}$ )143.3百萬帕

#### 伸臂第1節受壓應力

$3.337$ 百萬帕 < 容許抗壓應力( $\sigma_{ca}$ ) 124.6百萬帕或容許承壓應力( $\sigma_{da}$ ) 203.486 百萬帕

剪應力是伸臂因各種荷重所產生之平行於結構橫截面的剪力而造成。於吊桿舉升時，垂直靜荷重及垂直動荷重對於伸臂均產生剪力，最大剪力為兩荷重之和。

伸臂第1節截面積

$$(0.12 \times 0.15) - (0.116 \times 0.146) = 0.018 - 0.016936 = 0.001064 \text{ 平方公尺}$$

伸臂第1節受最大剪應力

$$[(38 + 32) + (24 + 32) + 20] + 500 / 0.001064 = 646 / 0.001064 = 0.607143 \text{ 百萬帕}$$

#### 伸臂第1節受剪應力

$0.607143$ 百萬帕 < 容許抗剪應力( $\tau$ ) 82.73百萬帕

為檢核前述應力分析結果，本研究另以 ANSYS 軟體進行機械手臂之結構強度分析。力有機械吊桿之有限元素模型如圖 3.20 所示，各結構件以梁元素模擬，並給予結構件截面積相關尺寸及材料性質。

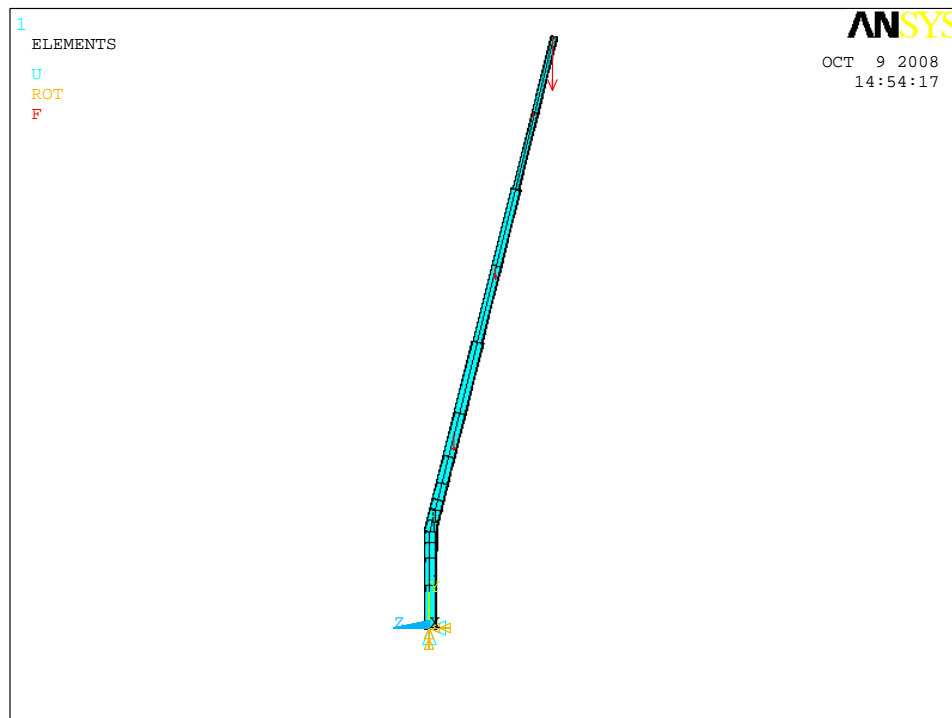


圖 3.20 力有機械吊桿之有限元素模型

當僅考慮垂直荷重時，以有限元素分析力有機械吊桿之應力大小及分佈如圖 3.21 所示，最大應力值 127.88 牛頓/平方公釐，與前述基礎材料力學公式計算所得最大應力值 126.93 牛頓/平方公釐相近。

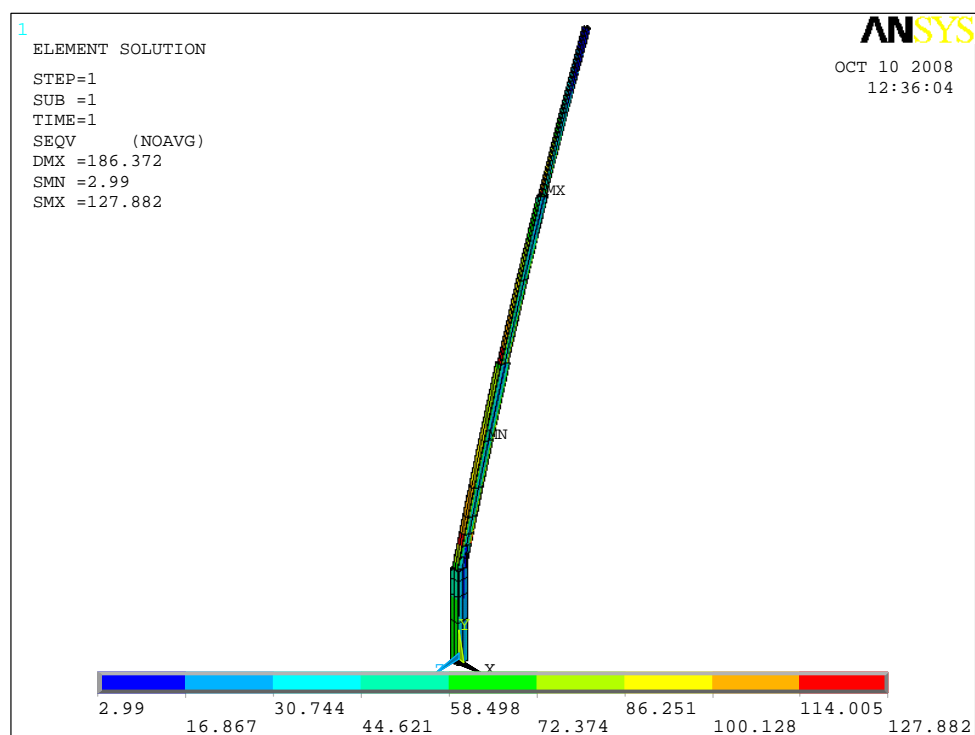


圖 3.21 力有機械吊桿之應力大小及分佈(僅考慮垂直荷重)

若進一步將水平荷重及風力合併垂直荷重考慮，以有限元素分析力有機械吊桿之應力大小及分佈如圖 3.22 所示，最大應力值 140.45 牛頓/平方公釐，與前述以基礎材料力學公式計算所得之最大應力值 143.27 牛頓/平方公釐相近。

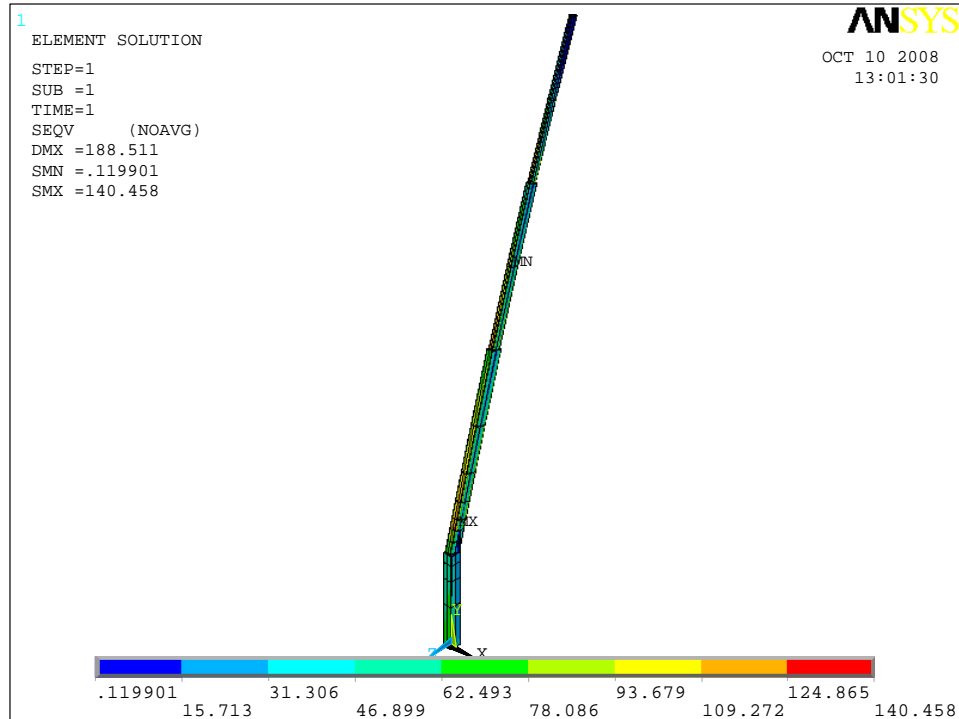


圖 3.22 力有機械吊桿之應力大小及分佈(考慮垂直、水平及風力荷重)

### 3.3.2 機械手臂整體結構強度有限元素分析

機械手臂對橋檢車產生最大傾覆力矩是在機械手臂各臂完全伸長且承受負載的狀況，此臨界狀況下之結構強度須加以檢核。以第 3 臂減重前設計之有限元素模型如圖 3.23 所示，各結構件以梁元素模擬，並給予結構件截面積相關尺寸及材料性質。



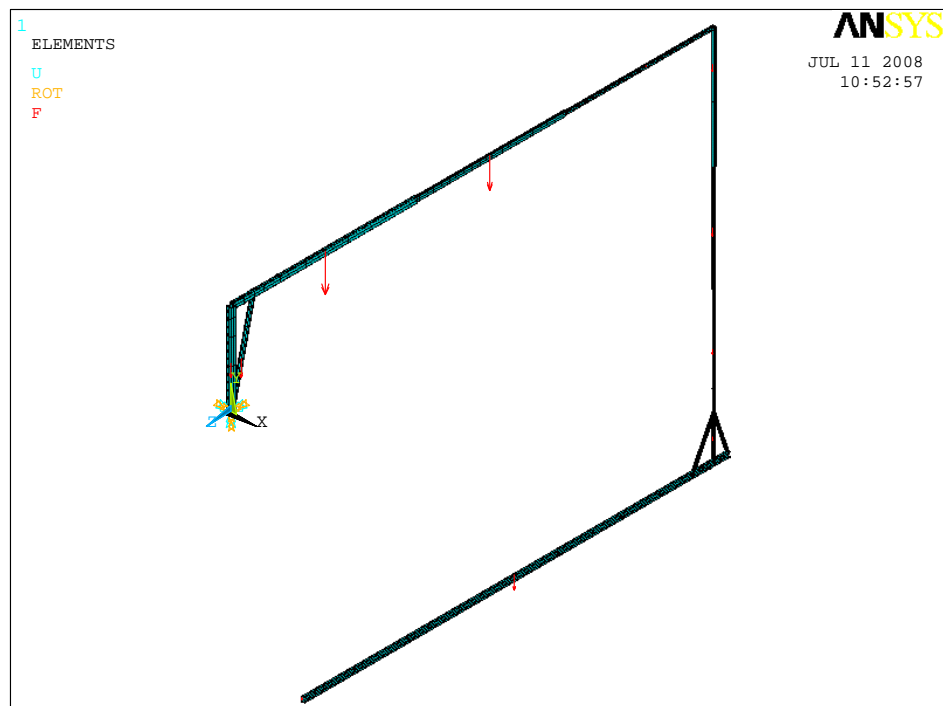


圖 3.23 機械手臂(初始設計)之有限元素模型

以有限元素進行靜態分析結果如圖 3.24 及圖 3.25 所示，圖 3.24 為機械手臂各結構件之應力大小及分佈，最大應力值 152.67 牛頓/平方公釐，在第 2 臂之鋼管結構中。若以本研究所用鋼管 STPG38 之降伏強度 215.6 牛頓/平方公釐計算，安全係數為 1.4。圖 3.25 為顯示機械手臂各結構件之應變大小及分佈，最大應變值  $0.727\text{E-}3$ 。

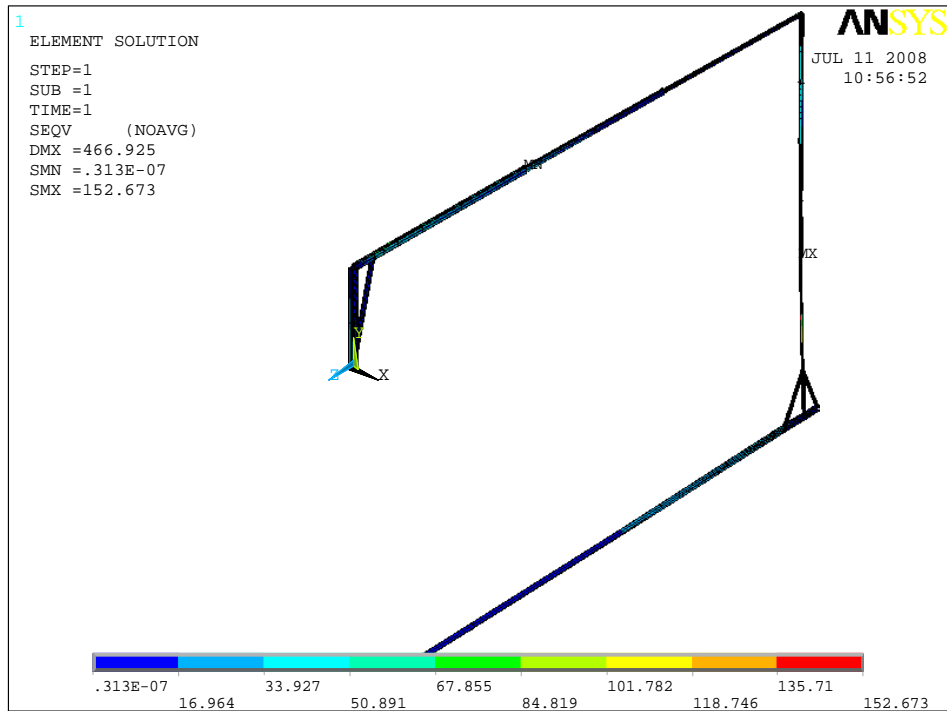


圖 3.24 機械手臂各結構件之應力大小及分佈

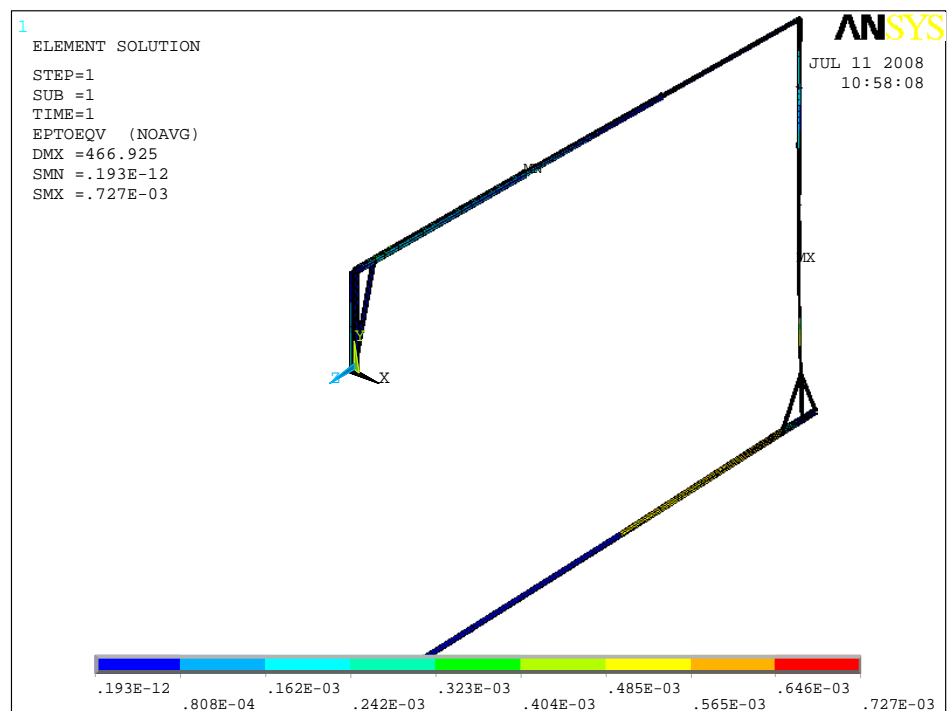


圖 3.25 機械手臂各結構件之應變大小及分佈

個別檢視第 3 臂，其應力大小及分佈如圖 3.26 所示，最大應力 37.93 牛頓/平方公釐，而圖 3.27 則為應變大小及分佈，最大應變 0.676E-3。

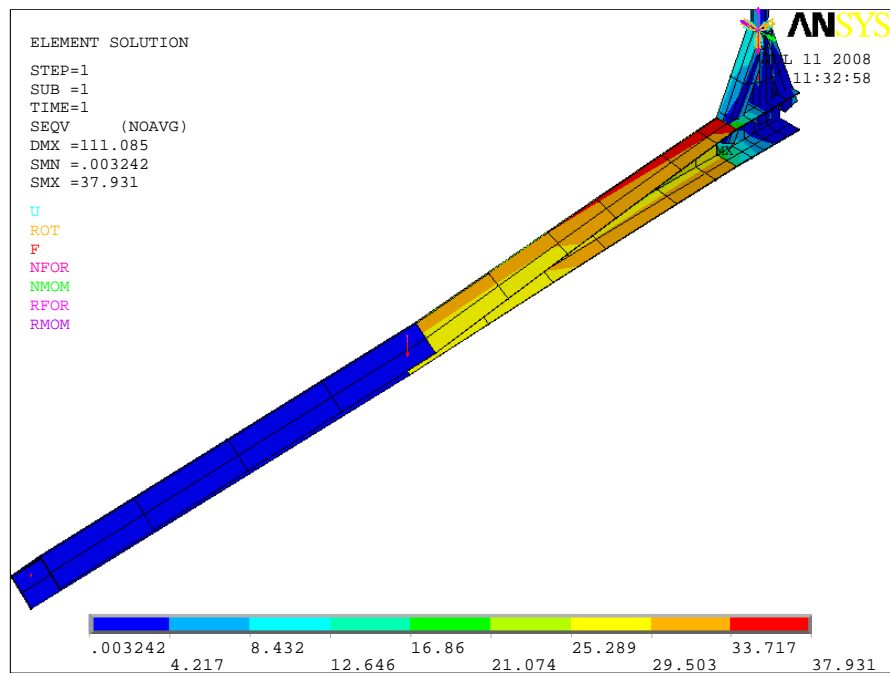


圖 3.26 第 3 臂之應力大小及分佈

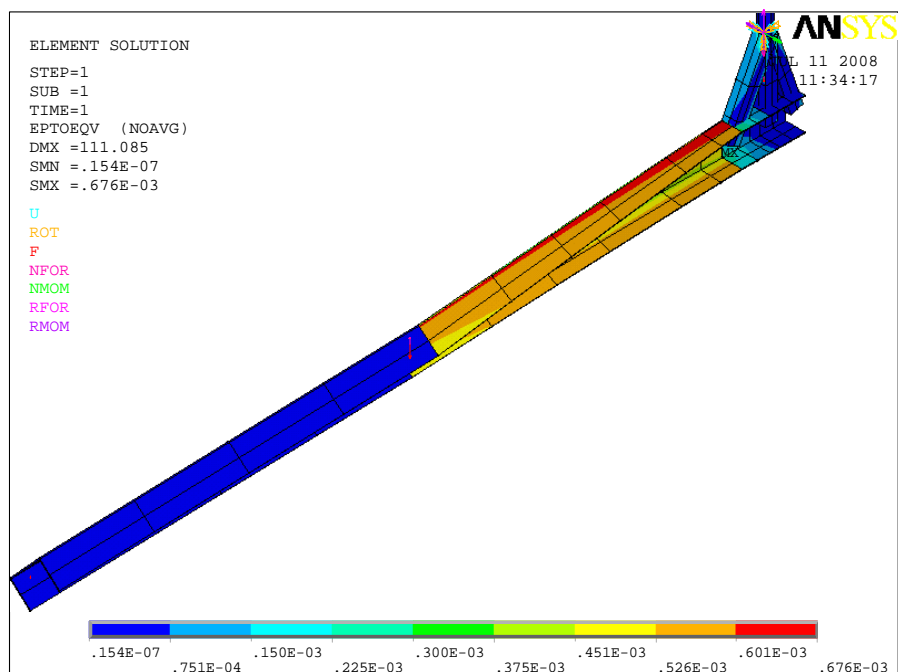


圖 3.27 第 3 臂之應變大小及分佈

再以第 3 臂減重設計後之結構重新進行有限元素分析，有限元素模型如圖 3.28 所示，各結構件仍以梁元素模擬，並給予結構件截面積相關尺寸及材料性質。

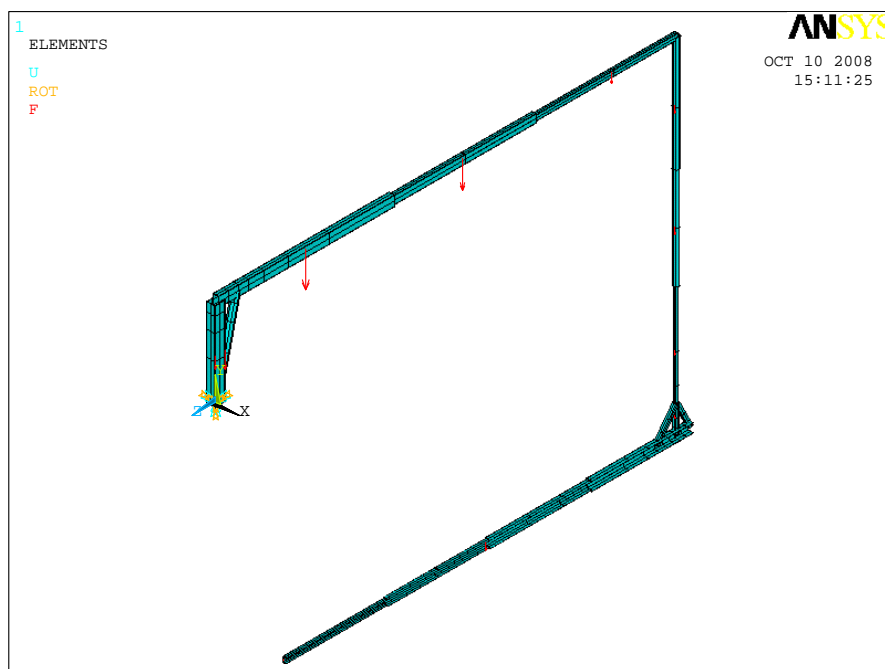


圖 3.28 機械手臂(減重設計)之有限元素模型

以有限元素進行靜態分析之結果如圖 3.29 及圖 3.30 所示，圖 3.29 顯示機械手臂各結構件之應力大小及分佈，最大應力值 100.36 牛頓/平方公釐，在第 2 臂之鋼管結構中，若以所用鋼管 STPG38 之降伏強度 215.6 牛頓/平方公釐計算，安全係數 2.15。

比較第 3 臂減重前後之應力變化，可以發現第 3 臂減重後安全係數由 1.4 提升至 2.15，顯見第 3 臂減重後對提升安全性具有顯著效果，圖 3.30 為機械手臂各結構件之應變大小及分佈，最大應變值  $0.602\text{E-}3$ 。

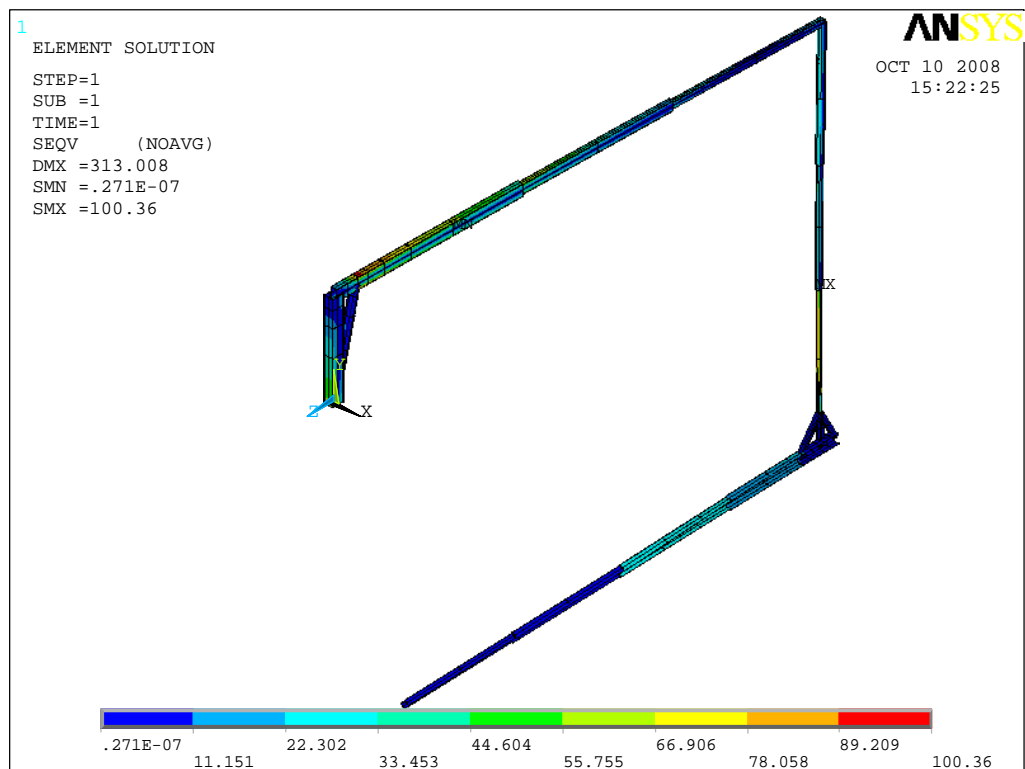


圖 3.29 機械手臂(減重設計)各結構件之應力大小及分佈

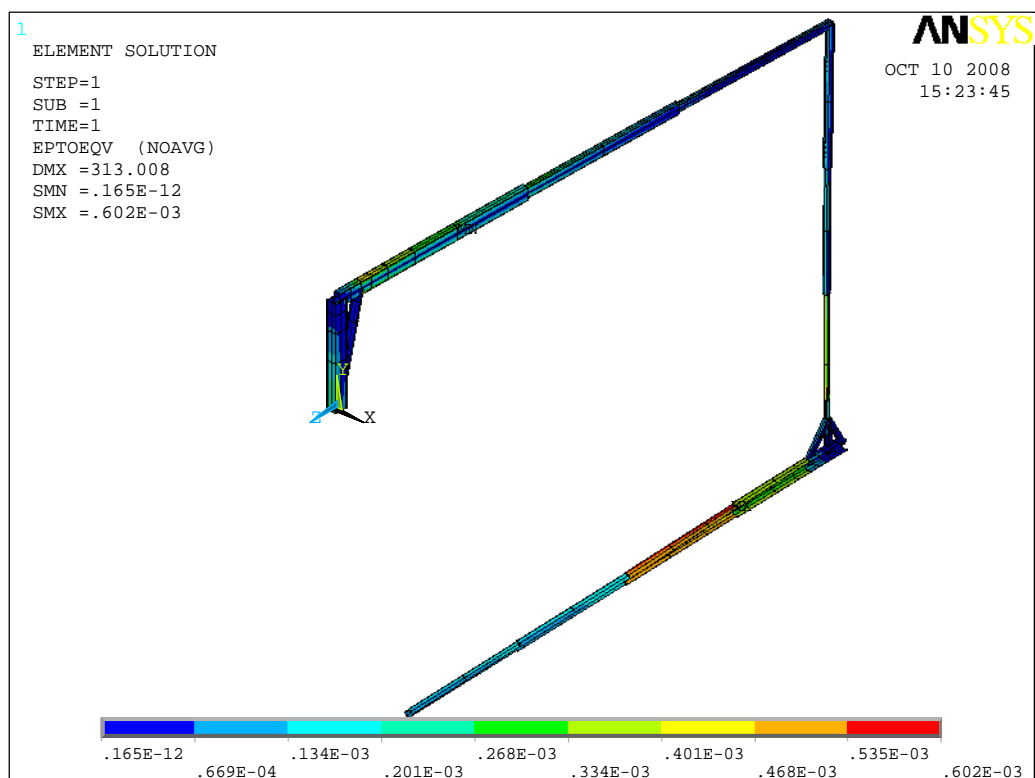


圖 3.30 機械手臂(減重設計)各結構件之應變大小及分佈

機械手臂操作時除承受其結構之自重及所承載之攝影機重量外，還受風力之影響。風力大小決定於風速、風壓及受風面積，若以 7 級風最大風速 17.1 公尺/秒計算，由風速與風壓之關係式可得風壓為 146.205 牛頓/平方公尺，再由受風面積可計算得機械手臂第 1 臂各節分別受風力 49.92 牛頓、32.36 牛頓、21.5 牛頓，第 2 臂各節分別受風力 9.46 牛頓、6.72 牛頓、4.6 牛頓，第 3 臂受總風力 24.5 牛頓。將風力加入有限元素模型分析結果如圖 3.31、圖 3.32 所示，圖 3.31 顯示機械手臂各結構件之應力大小及分佈，最大應力值 103.896 牛頓/平方公釐，在第 2 臂之鋼管結構中。圖 3.32 顯示機械手臂各結構件之應變大小及分佈，最大應變值 0.625E-3，最大應力及應變值均約略大於未考慮風力作用時，但最大應力之安全係數仍可達 2.07。

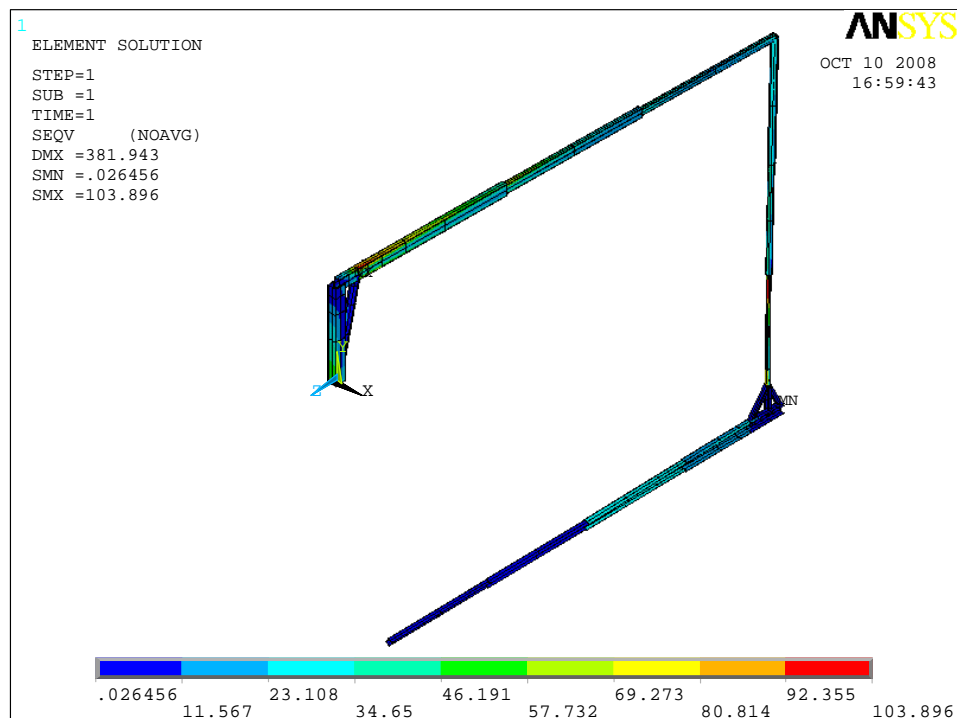


圖 3.31 機械手臂(減重設計)各結構件之應力大小及分佈(考慮受風力作用)

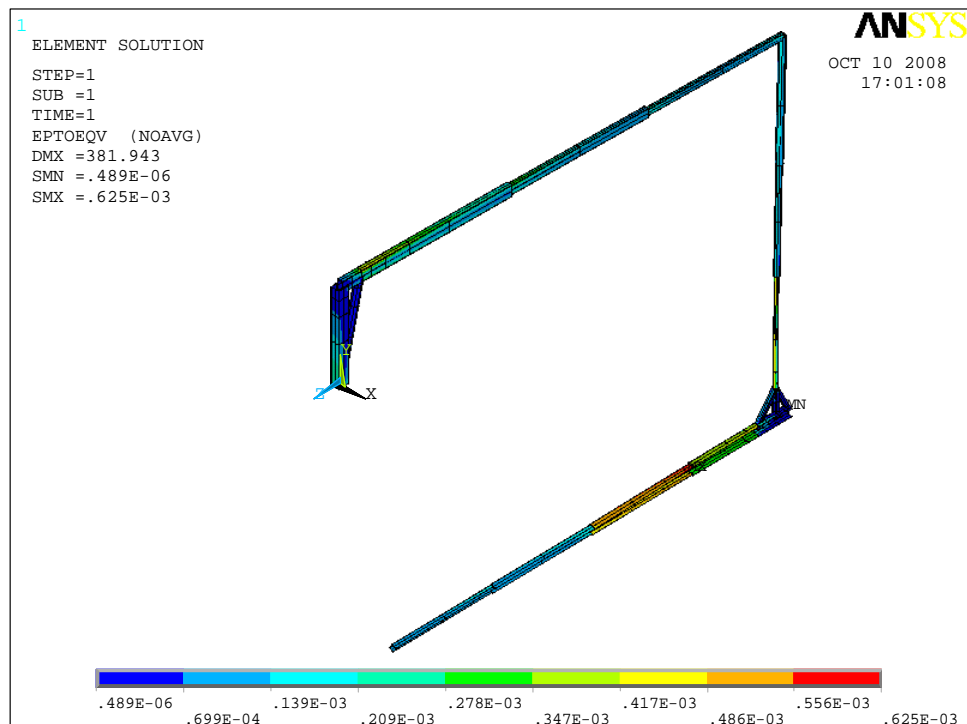


圖 3.32 機械手臂(減重設計)各結構件之應變大小及分佈(考慮受風力作用)

當機械手臂完成組裝後，其操作時之動態表現將受各種負荷及頻率影響。在動態分析時，將評估機械手臂第 1 臂伸臂吊桿水平向外至最大伸長量且第 2 臂鋼管垂直下伸至最大伸長量時，機械手臂受自重及承載重的簡諧振動(Harmonic vibration)動態作用力，振動頻率從 1Hz 到 50Hz 下的表現。

機械手臂受動態作用力時第 3 臂末端裝置攝影機位置在各振動頻率下的垂直方向位移量如圖 3.33 所示，受動態作用力頻率 2Hz 時，機械手臂將產生較大的共振現象，此時第 3 臂末端裝置攝影機位置垂直位移量最大，而在作用力頻率 15Hz 以上時動態效應即不顯著。

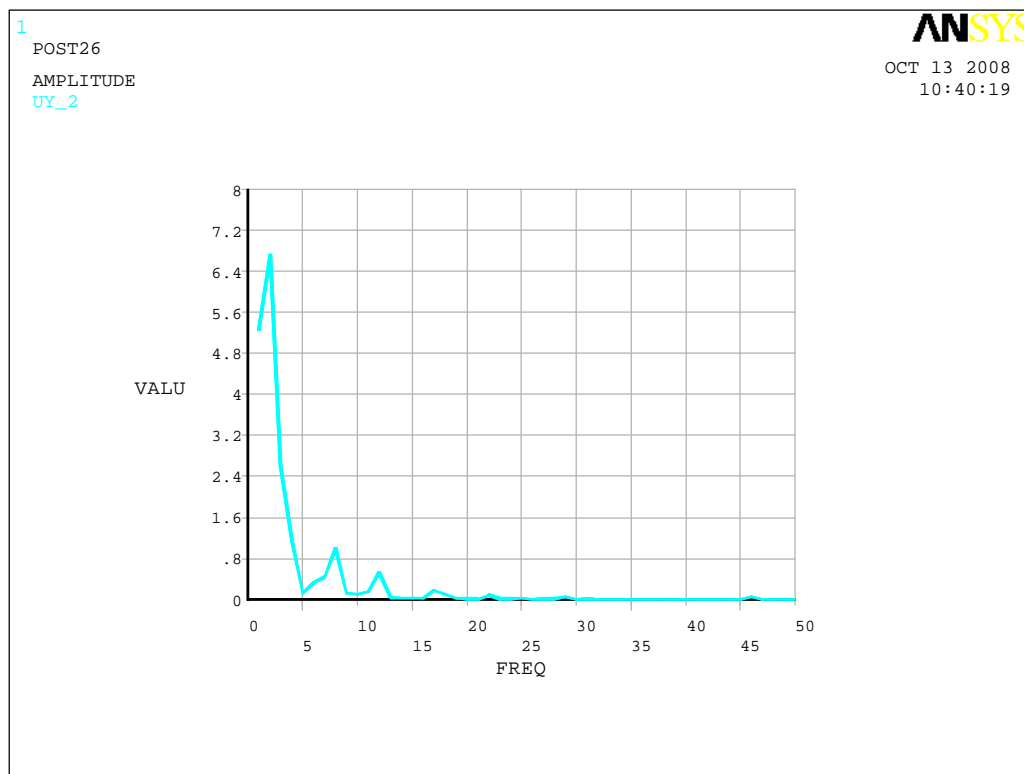


圖 3.33 機械手臂受各振動頻率動態作用力下的垂直方向位移量

再考量機械手臂受振動頻率 1Hz 到 50Hz 之風荷重的簡諧振動，機械手臂受動態風作用力時第 3 臂末端裝置攝影機位置在各振動頻率下的水平方向位移量如圖 3.34 所示，受動態作用力頻率 4Hz 時，機械手臂將產生較大的共振現象，此時第 3 臂末端裝置攝影機位置水平位移量最大，而在作用力頻率 15Hz 以上時動態效應即快速遞減。



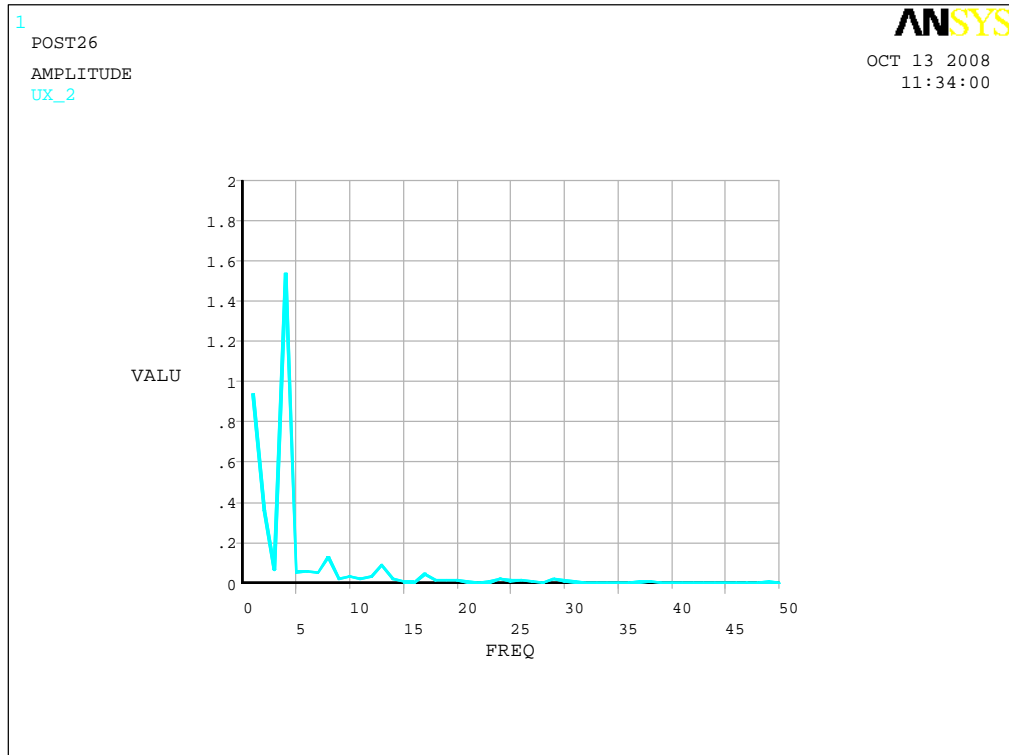


圖 3.34 機械手臂受各振動頻率動態風力下的水平方向位移量

### 3.4 橋梁檢測裝置附屬結構強度分析

本研究開發之3.5噸車輛裝載橋梁檢測機構之重要附屬結構包括導引機械手臂第2臂各節鋼套管伸縮的銅柱、結合橋梁檢測機構與車身大梁的聯結栓及車身大梁結構等，各附屬結構之強度計算列於以下各節。

#### 3.4.1 銅柱結構強度分析

導引機械手臂第2臂各節鋼套管伸縮的銅柱結構以承受剪力為主，其所承受之剪應力應小於設計強度。銅柱結構之剪力來自於抵抗機械手臂第2臂各節鋼套管彼此間的相對轉動，而此轉動是由機械手臂第3臂自重及所承載之攝影機重量對第2臂鋼套管產生的力矩所造成，此外，風力作用於機械手臂第3臂時亦會對第2臂鋼套管產生一旋轉力矩。

➤ 結構自重及承載重量之影響

為方便分析銅柱結構所承受之剪力大小，設全域(global)及局部(local)2 座標系統，並進行座標轉換，將原先以全域座標系統表示的重力、風力等作用力轉換至銅柱結構所座落的局部座標系統，再進一步計算力矩。局部座標系統以機械手臂第 2 臂圓管軸向為 z 軸，第 3 臂方管軸向為 x 軸；全域座標系統則以垂直地面軸向定義為 z 軸，座標系統如圖 3.35 所示。



圖 3.35 座標系統轉換示意圖

全域座標系統先以局部 z 軸逆時針旋轉  $\theta_3$  後，再以局部 y 軸旋轉  $\theta_2$ ，則 2 座標系統有如下的轉換矩陣。

Roll-Pitch Transformation

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\cos \theta_2 \sin \theta_3 & \sin \theta_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\cos \theta_2 \sin \theta_3 & \sin \theta_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{adj(A)}{|A|} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$|A| = \begin{vmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\cos \theta_2 \sin \theta_3 & \sin \theta_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_2 \end{vmatrix} = (\cos \theta_2 \cos \theta_3)^2 + (\sin \theta_2 \sin \theta_3)^2 + (\sin \theta_2$$

$$\cos \theta_3)^2 + (\cos \theta_2 \sin \theta_3)^2 = 1$$

$$adj(A) = C^T = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}^T$$

$$C_{11} = \begin{vmatrix} \cos \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_2 \end{vmatrix} = \cos \theta_2 \cos \theta_3$$

$$C_{12} = - \begin{vmatrix} \sin \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & \cos \theta_2 \end{vmatrix} = -\cos \theta_2 \sin \theta_3$$

$$C_{13} = \begin{vmatrix} \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \\ -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & \sin \theta_2 \sin \theta_3 \end{vmatrix} = \sin \theta_2$$

$$C_{21} = - \begin{vmatrix} -\cos \theta_2 \sin \theta_3 & \sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_2 \end{vmatrix} = \sin \theta_3$$

$$C_{22} = \begin{vmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & \cos \theta_2 \end{vmatrix} = \cos \theta_3$$

$$C_{23} = - \begin{vmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & \sin \theta_2 \sin \theta_3 \end{vmatrix} = 0$$

$$C_{31} = \begin{vmatrix} -\cos \theta_2 \sin \theta_3 & \sin \theta_2 \\ \cos \theta_3 & 0 \end{vmatrix} = -\sin \theta_2 \cos \theta_3$$

$$C_{32} = - \begin{vmatrix} -\cos\theta_2 \cos\theta_3 & \sin\theta_2 \\ \sin\theta_3 & 0 \end{vmatrix} = \sin\theta_2 \sin\theta_3$$

$$C_{33} = \begin{vmatrix} \cos\theta_2 \cos\theta_3 & -\cos\theta_2 \sin\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{vmatrix} = \cos\theta_2$$

$$adj(A) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_2 \cos\theta_3 & -\cos\theta_2 \sin\theta_3 & \sin\theta_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ -\sin\theta_2 \cos\theta_3 & \sin\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & -\sin\theta_2 \cos\theta_3 \\ -\cos\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & \sin\theta_2 \sin\theta_3 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}$$

橋梁檢測機械手臂組裝時，第3臂的外轉角度與橋檢車作業時停靠點有關，停靠點距離橋邊近時，所需外轉角度小；反之，若橋邊有人行道或橋檢車停靠距橋邊較遠時，外轉角度大。當執行橋檢作業操控機械手臂時，若能一直保持第2臂垂直地面，亦即第3臂能保持水平時，機械手臂第3臂之自重及承載重將不會因第3臂的外轉角度使第2臂鋼套管間產生相對旋轉之扭力，但若第3臂未能保持水平，則其重力及外轉角將使第2臂鋼套管產生扭力，讓套管間相對旋轉，進而使銅柱承受剪應力。故需計算不同第2臂及第3臂的斜傾及外轉角度，以決定最佳之銅柱設計方案。圓柱形銅柱之橫截面直徑為8公釐，而矩形立方體銅柱之橫截面為11公釐×16公釐。

$$[G]_{local} = adj(A) [G]_{global}$$

$$G = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \frac{adj(A)}{|A|} \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}$$

重力  $G$  對局部座標系統原點所產生的力矩  $M$  以局部座標系統表示，如下式：

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{G} \quad \text{其中，}\vec{r}\text{ 是重力作用點的位置向量。}$$

(一)第2臂與地面保持垂直，第3臂順時針轉  $25^\circ$ ：

$$\theta_2 = 0; \cos\theta_2 = 1, \sin\theta_2 = 0$$

$$\theta_3 = -25^\circ;$$

$$|A| = \cos^2\theta_3 + \sin^2\theta_3 = 1$$

$$adj(A)=\begin{bmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & 0 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

重力  $G$  以 local 座標系統表示，如下式：

$$\mathbf{G}=\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & 0 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & 0 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}$$

$$\ddot{\mathbf{M}}=(X_g \cos\theta_3, X_g \sin\theta_3, 0) \times (0, 0, -mg)=\begin{vmatrix} i & j & k \\ X_g \cos\theta_3 & X_g \sin\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & -mg \end{vmatrix}=(-mgX_g \sin\theta_3) \mathbf{i} + (mgX_g \cos\theta_3) \mathbf{j}$$

$$\sin\theta_3) \mathbf{i} + (mgX_g \cos\theta_3) \mathbf{j}$$

$\mathbf{M}_x=(-mgX_g \sin\theta_3)\mathbf{i}$ ：對銅柱產生扭力，大部份被兩內環的 Couple 反作用力抵銷

$\mathbf{M}_y=(mgX_g \cos\theta_3)\mathbf{j}$ ：對銅柱產生摩擦壓力，大部份被兩內環的 Couple 反作用力抵銷

銷

$\mathbf{M}_z=0$ ：對銅柱不產生剪力

(二)第 2 臂斜傾  $25^\circ$ ，第 3 臂順時針轉  $25^\circ$ ：

$$\theta_3=-25^\circ; \cos\theta_3=0.9063, \sin\theta_3=-0.4226$$

$$\theta_2=-25^\circ; \cos\theta_2=0.9063, \sin\theta_2=-0.4226$$

$$|A|=\cos^2\theta_3+\sin^2\theta_3=1$$

重力  $G$  以 local 座標系統表示，如下式：

$\mathbf{G}=\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}$

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos\theta_2 \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & -\sin\theta_2 \cos\theta_3 \\ -\cos\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & \sin\theta_2 \sin\theta_3 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos\theta_2 \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & -\sin\theta_2 \cos\theta_3 \\ -\cos\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & \sin\theta_2 \sin\theta_3 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} mg \sin\theta_2 \cos\theta_3 \\ -mg \sin\theta_2 \sin\theta_3 \\ -mg \cos\theta_2 \end{bmatrix}$$

重力  $G$  對局部座標系統原點所產生的力矩  $M$  以局部座標系統表示，如下式：

$$\ddot{M} = (X_g \cos \theta_3, X_g \sin \theta_3, 0) \times (mg \sin \theta_2 \cos \theta_3, -mg \sin \theta_2 \sin \theta_3, mg \cos \theta_2)$$

$$\cos \theta_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ X_g \cos \theta_3 & X_g \sin \theta_3 & 0 \\ mg \sin \theta_2 \cos \theta_3 & -mg \sin \theta_2 \sin \theta_3 & mg \cos \theta_2 \end{vmatrix} = (-mg X_g \cos \theta_2 \sin \theta_3) i + (mg X_g \cos \theta_2 \cos \theta_3) j - (2mg X_g \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_3) k$$

第 1 個力矩  $(M)_1$ ，由第 3 臂重量 12 公斤及第 3 臂中間位置的 CCD 重量 2.5 公斤，合計 14.5 公斤所產生：

$$(M_z)_1 = (-2 \times 14.5 \times 9.8 \times 3 \times \sin -25^\circ \times \cos -25^\circ \times \sin -25^\circ) = 138 \text{ 牛頓-公尺} = (F)_1 \times 0.035 \text{ 公尺}$$

第 2 臂鋼管半徑 0.035 公尺

銅柱承受剪力  $(F)_1 = 3943$  牛頓

$$\tau_1 (\text{圓形銅柱剪應力}) = (F)_1 \div A = 3943 \div \pi(0.004)^2 = 78,440,650 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\tau_1 (\text{矩形銅柱剪應力}) = (F)_1 \div A = 3943 \div (0.011 \times 0.016) = 22,403,409 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

第 2 個力矩  $(M)_2$  由第 3 臂尾端位置的 CCD 重量 2.5 公斤所產生：

$$(M_z)_2 = (-2 \times 2.5 \times 9.8 \times 6 \times \sin -25^\circ \times \cos -25^\circ \times \sin -25^\circ) = 47.6 \text{ 牛頓-公尺} = (F)_2 \times 0.035 \text{ 公尺}$$

第 2 臂鋼管半徑 0.035 公尺

銅柱承受剪力  $(F)_2 = 1360$  牛頓

$$\tau_2 (\text{圓形銅柱剪應力}) = (F)_2 \div A = 1360 \div \pi(0.004)^2 = 27,048,326 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\tau_1 (\text{矩形銅柱剪應力}) = (F)_1 \div A = 1360 \div (0.011 \times 0.016) = 7,727,273 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\text{總剪力 } F = (F)_1 + (F)_2 = 3943 + 1360 = 5303 \text{ 牛頓}$$

$$\text{圓形銅柱總剪應力 } \tau_1 = \tau_1 + \tau_2 = 78440650 + 27048326 = 105,488,976 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\text{矩形銅柱總剪應力 } \tau_1 = \tau_1 + \tau_2 = 22403409 + 7727273 = 30,130,682 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\text{退火黃銅抗剪強度}(\tau_y) \text{ 220 百萬帕} = 220 \times 10^6 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\text{圓形銅柱安全係數 } \tau_y / \tau = 220 \times 10^6 / 105488976 = 2.1$$



矩形銅柱安全係數  $\tau_y/\tau = 220 \times 10^6 / 30130682 = 7.3$

(三)第 2 臂斜傾  $15^\circ$ ，第 3 臂順時針轉  $25^\circ$ ：

$$\theta_3 = -25^\circ ; \cos\theta_3 = 0.9063 , \sin\theta_3 = -0.4226$$

$$\theta_2 = -15^\circ ; \cos\theta_2 = 0.9659 , \sin\theta_2 = -0.2588$$

$$|A| = \cos^2\theta_3 + \sin^2\theta_3 = 1$$

重力  $G$  以局部座標系統表示，如下式：

$G =$

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & -\sin\theta_2 \cos\theta_3 \\ -\cos\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & \sin\theta_2 \sin\theta_3 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & -\sin\theta_2 \cos\theta_3 \\ -\cos\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & \sin\theta_2 \sin\theta_3 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mg \sin\theta_2 \cos\theta_3 \\ -mg \sin\theta_2 \sin\theta_3 \\ -mg \cos\theta_2 \end{bmatrix}$$

重力  $G$  對局部座標系統原點所產生的力矩  $M$  以局部座標系統表示，如下式：

$$\ddot{M} = (X_g \cos\theta_3 , X_g \sin\theta_3 , 0) \times (mg \sin\theta_2 \cos\theta_3 , -mg \sin\theta_2 \sin\theta_3 , mg$$

$$\cos\theta_2) = \begin{vmatrix} i & j & k \\ X_g \cos\theta_3 & X_g \sin\theta_3 & 0 \\ mg \sin\theta_2 \cos\theta_3 & -mg \sin\theta_2 \sin\theta_3 & -mg \cos\theta_2 \end{vmatrix} = (-mg X_g \cos\theta_2 \sin\theta_3) i + (mg X_g$$

$$\cos\theta_2 \cos\theta_3) j - (2mg X_g \sin\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_3) k$$

第 1 個力矩( $M$ )<sub>1</sub>，由第 3 臂重量 12 公斤及第 3 臂中間位置的 CCD 重量 2.5 公斤，

合計 14.5 公斤所產生：

$$(M_z)_1 = (-2 \times 14.5 \times 9.8 \times 3 \times \sin-15^\circ \times \cos-25^\circ \times \sin-25^\circ) = -83.7 \text{ 牛頓-公尺} = (F)_1 \times 0.035$$

公尺

鋼管半徑 0.035 公尺

銅柱承受剪力( $F$ )<sub>1</sub> = 2391 牛頓

$$\tau_1 (\text{圓形銅柱剪應力}) = (F)_1 \div A = 2391 \div \pi(0.004)^2 = 47,575,960 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\tau_1 (\text{矩形銅柱剪應力}) = (F)_1 \div A = 2391 \div (0.011 \times 0.016) = 13,582,227 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

第 2 個力矩( $M$ )<sub>2</sub>，因第 3 臂尾端位置的 CCD 重量 2.5 公斤所產生：

$$(M_z)_2 = (-2 \times 2.5 \times 9.8 \times 6 \times \sin 15^\circ \times \cos 25^\circ \times \sin 25^\circ) = 29 \text{ 牛頓-公尺} = (F)_2 \times 0.035 \text{ 公尺}$$

尺

第 2 臂鋼管半徑 0.035 公尺

銅柱承受剪力( $F$ )<sub>2</sub>= 832.6 牛頓

$$\tau_2 (\text{圓形銅柱剪應力}) = (F)_2 \div A = 832.6 \div \pi(0.004)^2 = 16,564,380 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\tau_2 (\text{矩形銅柱剪應力}) = (F)_2 \div A = 832.6 \div (0.011 \times 0.016) = 4,730,682 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\text{總剪力 } F = (F)_1 + (F)_2 = 2391 + 832.6 = 3223.6 \text{ 牛頓}$$

$$\text{圓形銅柱總剪應力 } \tau_1 = \tau_1 + \tau_2 = 47575960 + 16564380 = 64,140,340 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\text{矩形銅柱總剪應力 } \tau_1 = \tau_1 + \tau_2 = 13582227 + 4730682 = 18,312,909 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\text{退火黃銅抗剪強度}(\tau_y) \text{ 220 百萬帕} = 220 \times 10^6 \text{ 牛頓/平方公尺}$$

$$\text{圓形銅柱安全係數 } \tau_y / \tau = 220 \times 10^6 / 64140340 = 3.43$$

$$\text{矩形銅柱安全係數 } \tau_y / \tau = 220 \times 10^6 / 18312909 = 12.01$$

由以上計算顯示，矩形銅柱因受剪力面積較大而有較大之安全係數，茲將不同第 2 臂及第 3 臂的斜傾及外轉角度對應之矩形銅柱所受剪應力及其安全係數整理如表 3-3。

表3-3 第2臂及第3臂不同斜傾及外轉角度對應之矩形銅柱剪應力及其安全係數

| 施於矩形銅柱之    |     | 第 3 臂外轉角度         |                   |                    |
|------------|-----|-------------------|-------------------|--------------------|
| 剪應力(安全係數)  |     | 15°               | 20°               | 25°                |
| 單位：牛頓/平方公尺 |     |                   |                   |                    |
| 第 2 臂      | 0°  | 0                 | 0                 | 0                  |
| 斜傾角        | 15° | 11,334,773(19.41) | 15,481,136(14.21) | 18,312,909 (12.01) |
|            | 25° | 19,663,465(11.19) | 25,279,716(8.70)  | 30,130,682 (7.30)  |

➤ 風力作用之影響

表3-4 平均風速及所對應之蒲福風級表

|        |    |    | 高出空曠<br>地面 10 公<br>尺之相當<br>平均風速 | 陸地情形                | 海面情形                            |
|--------|----|----|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 風<br>級 | 風  | 浪  | 公尺/秒                            |                     |                                 |
| 0      | 無風 | -  | 0.0~0.2                         | 靜，煙直上。              | 海面如鏡。                           |
| 1      | 軟風 | 微波 | 0.3~1.5                         | 炊煙能表示風向，風標不動。       | 海面生鱗狀波紋、波峰無泡沫。                  |
| 2      | 輕風 | 微波 | 1.6~3.3                         | 風拂面樹葉有聲，普通風標轉動。     | 微波，波峰光滑而不破裂。                    |
| 3      | 微風 | 小波 | 3.4~5.4                         | 樹葉及小枝動搖，旌旗招展。       | 小波，波峰開始破裂泡沫如珠，波峰偶泛白沫。           |
| 4      | 和風 | 小浪 | 5.5~7.9                         | 地面揚塵，紙片飛舞，小樹幹搖動。    | 小波漸高，波峰白沫漸多。                    |
| 5      | 清風 | 中浪 | 8.0~10.7                        | 有葉之小樹搖擺，內陸水面有小波。    | 中浪漸高，波峰泛白沫，偶起浪花。                |
| 6      | 強風 | 大浪 | 10.8~13.8                       | 大樹枝搖動，電線呼呼有聲，舉傘困難。  | 大浪形成，泛白沫波峰漸廣，漸起浪花。              |
| 7      | 疾風 | 大浪 | 13.9~17.1                       | 全樹搖動，迎風步行有阻力。       | 海面湧突，白浪泡沫沿風成條，浪濤漸起。             |
| 8      | 大風 | 巨浪 | 17.2~20.7                       | 小枝吹折，行人不易前行。        | 巨浪漸升，波峰破裂，浪花明顯成條沿風吹起。           |
| 9      | 烈風 | 猛浪 | 20.8~24.4                       | 煙囪屋瓦等將被吹毀。          | 猛浪驚濤，海面漸呈洶湧，浪花白沫增濃，能見度減低。       |
| 10     | 狂風 | 狂濤 | 24.5~28.4                       | 陸上不常見，見則拔樹倒屋或有其他損毀。 | 猛浪翻騰，浪峰高聳，浪花白沫堆積，海面一片白浪，能見度更低。  |
| 11     | 暴風 | 狂濤 | 28.5~32.6                       | 陸上絕少，有則必重大災害。       | 狂濤高可掩蓋中小海輪，海面全成白沫，驚濤翻騰白浪，能見度大減。 |
| 12     | 颶風 | 狂濤 | 32.7~36.9                       | —                   | 空中充滿浪花飛沫，海面全呈白色浪濤，能見度惡劣。        |
| 13     | 颶風 | 狂濤 | 37.0~41.1                       | —                   | —                               |
| 14     | 颶風 | 狂濤 | 41.5~46.1                       | —                   | —                               |

|    |    |    | 高出空曠<br>地面 10 公<br>尺之相當<br>平均風速 | 陸地情形 | 海面情形 |
|----|----|----|---------------------------------|------|------|
| 15 | 颶風 | 狂濤 | 46.2~50.9                       |      |      |
| 16 | 颶風 | 狂濤 | 51.0~56.0                       |      |      |
| 17 | 颶風 | 狂濤 | 56.1~61.2                       |      |      |

當風力作用於機械手臂第 3 臂時，對第 2 臂鋼套管將產生旋轉力矩，銅柱此時亦承受剪應力。在不同風速風力條件下操作機械手臂時，銅柱承受的剪應力，謹計算如下：

減重設計後第 3 臂受風面積

$$[(0.13 \times 1.5) + (0.11 \times 1.5) + (0.09 \times 1.5) + (0.07 \times 1.5)] \times 0.5 = 0.3 \text{ 平方公尺}$$

風速 1.5 公尺/秒 (1 級風)時，風壓約 1.125 牛頓/平方公尺，第 3 臂受風力  $1.125 \times 0.3 = 0.3375$  牛頓，第 2 臂受風力形成的力矩  $0.3375 \times 3 = 1.0125$  牛頓-公尺。

第 2 臂受剪力  $1.0125 \div 0.035 = 28.93$  牛頓

第 2 臂圓管半徑 0.035 公尺

圓形銅柱承受剪應力  $28.93 / \pi(0.004)^2 = 575,544$  牛頓/平方公尺 = 0.575 百萬帕

矩形銅柱承受剪應力  $28.93 / (0.011 \times 0.016) = 164,375$  牛頓/平方公尺 = 0.164 百萬帕

風速 7.9 公尺/秒 (4 級風)時，風壓約 31.205 牛頓/平方公尺，第 3 臂受風力  $31.205 \times 0.3 = 9.3615$  牛頓，第 2 臂受風力形成的力矩  $9.3615 \times 3 = 28.0845$  牛頓-公尺。

第 2 臂受剪力  $28.0845 \div 0.035 = 802.4$  牛頓

第 2 臂圓管半徑 0.035 公尺

圓形銅柱承受剪應力  $802.4 / \pi(0.004)^2 = 15,963,241$  牛頓/平方公尺 = 15.963 百萬帕

矩形銅柱承受剪應力  $802.4 / (0.011 \times 0.016) = 4,559,091$  牛頓/平方公尺 = 4.559 百萬帕

風速 17.1 公尺/秒(7 級風)時，風壓約 146.205 牛頓/平方公尺，第 3 臂受風力  $146.205 \times 0.3 = 43.8615$  牛頓，第 2 臂受風力形成的力矩  $43.8615 \times 3 = 131.5845$  牛頓-公尺。

第 2 臂受剪力  $131.5845 \div 0.035 = 3759.5$  牛頓

第 2 臂圓管半徑 0.035 公尺

圓形銅柱承受剪應力  $3759.5/\pi(0.004)^2 = 74,792,876$  牛頓/平方公尺 = 74.792 百萬帕

矩形銅柱承受剪應力  $3759.5/(0.011(0.016)) = 21,360,795$  牛頓/平方公尺 = 21.360 百萬

帕

退火黃銅抗剪強度( $\tau_y$ ) 220 百萬帕 =  $220 \times 10^6$  牛頓/平方公尺

圓形銅柱安全係數  $\tau_y/\tau = 220/74.792 = 2.94$

矩形銅柱安全係數  $\tau_y/\tau = 220/21.36 = 10.3$

計算結果顯示，即使在 7 的作業環境下，銅柱之安全係數仍達 10.3。

高出空曠地面 10 處之平均風速及所對應之蒲福風級表列於表 3-4，而對應之陸、海面情形亦列於表內。

### 3.4.2 聯結栓及車身大梁結構強度分析

依「移動式起重機安全檢查暫用構造標準(內政部 69.6.28 台內勞字第22754 號令)」，車輛裝載橋梁檢測機構受力示意圖如圖3.356所示，結合橋梁檢測機構與車身大梁的聯結栓及車身大梁結構之強度計算公式如下：

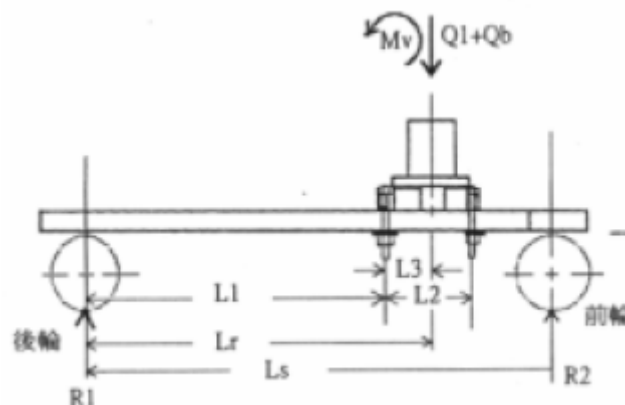


圖 3.356 車輛裝載橋梁檢測機構受力示意圖

$$2 \times R1 = [(Ls - Lr) \times (Q1 + Qb)] / Ls + Mv / Lr \text{ (未考慮車身重量)}$$

車身大梁結構(2支)強度計算

$$\sigma = R1 \times L1 / (Z \times 2)$$

聯結栓(4支)強度計算

$$\sigma = [M_v - L_3 \times (Q_1 + Q_b)] / (4 \times A_r \times L_2)$$

其中，

Z=車架斷面係數

A<sub>r</sub>= 螺栓橫面積

Q<sub>1</sub>= 吊重

Q<sub>b</sub>= 吊臂全重

以力有機械吊桿附加於三菱堅達小貨車，車後輪反作用力R<sub>1</sub>依上式計算可得

$$2 \times R_1 = [(2.5 - 1.7) \times (200 \times 9.8 + 400 \times 9.8)] / 2.5 + [200 \times 9.8 \times 6.8 \times \cos 76^\circ + (38 + 32) \times 9.8 \times 2.6 \times \cos 76^\circ + (24 + 32) \times 9.8 \times 3.65 \times \cos 76^\circ + (20) \times 9.8 \times 5.75 \times \cos 76^\circ] / 1.7$$

$$2 \times R_1 = 1881.6 + [3224.3 + 431.49 + 484.59 + 272.64] / 1.7 = 4477.5$$

$$R_1 = 2238.75 \text{ 牛頓}$$

車身大梁結構斷面係數

$$Z = [0.05 \times (0.098)^3 - (0.05 - 0.004) \times (0.098 - 0.008)^3] / 12 \div (0.098 / 2) = 2.3 \times 10^{-5}$$

車身大梁結構強度

$$\sigma = 2238.75 \times 1.55 / (2.3 \times 10^{-5} \times 2) = 75.436 \times 10^6 \text{ 牛頓/平方公釐}$$

聯結栓強度

$$\sigma = [200 \times 9.8 \times 6.8 \times \cos 76^\circ + (38 + 32) \times 9.8 \times 2.6 \times \cos 76^\circ + (24 + 32) \times 9.8 \times 3.65 \times \cos 76^\circ + (20) \times 9.8 \times 5.75 \times \cos 76^\circ - 0.15 \times (200 \times 9.8 + 400 \times 9.8)] / (4 \times \pi \times 0.008^2 \times 0.3) = [3224.3 + 431.49 + 484.59 + 272.64 - 882] / 2.41 \times 10^{-4} = 14.65 \times 10^6 \text{ 牛頓/平方公釐}$$

「移動式起重機安全檢查構造標準」發布後已將前述強度計算取消。

### 3.5 橋梁檢測機械手臂操作程序

以橋梁檢測機械手臂執行檢測工作應有一套完整之標準作業程序，方能安全、有效率地執行檢測作業。此外，執行檢測工作時，橋檢車與橋邊之距離長度關係到橋面下之



最大檢視範圍及操控機械手臂之安定度和傾覆安全，亦應予以確認並律定，以維護作業安全。以下為橋梁檢測機械手臂之操作程序及橋檢車停靠處與橋邊距離長度之計算。

機械手臂之操作方式，如 圖 3.367 所示：

1. 第 1 臂伸長，第 2、3 臂接合。
  - (a)第 1 臂水平伸長，第 2、3 臂對接位置在吊桿轉軸(立柱)正後方 6 公尺處；
  - (b)第 3 臂與橋身縱向維持  $25^{\circ}$ ；
  - (c)第 2 臂完全收回；
  - (d)快速接頭對準、扣住，以 13 號梅花板手上扭力。
2. 第 1 臂舉升。
  - (a)舉升高度約上仰  $20^{\circ}$ ，此時第 3 臂應高於橋護欄；
  - (b)保持第 3 臂水平，維持 CCD 端高度。
3. 第 1 臂逆時鐘方向左迴轉。
  - (a)維持第 2 臂之長度呈完全收回狀態(注意調放鋼索，避免收緊，以保安全)；
  - (b)保持第 3 臂水平，維持 CCD 端高度。
  - (c)迴轉至第 3 臂與橋身縱向呈平行，跨出橋梁護欄。
4. 第 2 臂放長。
5. 第 1 臂逆時鐘方向左迴轉進橋梁底。

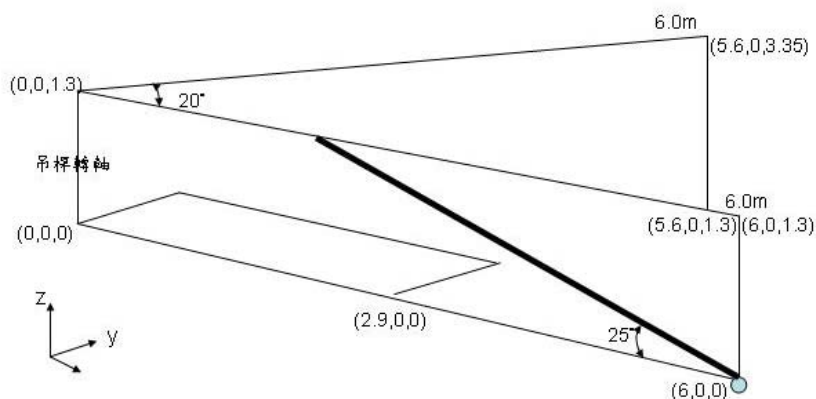


圖 3.367 機械手臂操作方式

➤ 橋檢車停靠處與橋邊之距離長度計算

機械手臂第 1 臂水平伸長 6 公尺，將第 3 臂與車輛縱軸線維持 25°夾角組裝後，先舉升 20°，再向外旋轉 25°，此時第 3 臂即與橋緣保持平行，而距離吊桿轉軸  $6 \times \sin 25^\circ = 2.54$  公尺，或距離車(輪胎)外緣  $2.54 - 0.55 = 1.99$  公尺。若橋護欄寬度以 0.5 公尺計算，而工作油壓腳向車緣外伸出 0.6 公尺，則橋梁檢測車停靠橋邊，距離橋內緣  $1.99 - 0.5 - 0.6 = 0.89$  公尺，若工作油壓腳不向車緣外伸出，則橋梁檢測車可停靠距橋內線之距離達  $1.99 - 0.5 = 1.45$  公尺。

若將第 3 臂與車輛縱軸線維持 20°或 15°夾角組裝後，則橋梁檢測車停靠橋邊，距離橋緣之距離列於表 3-5。

表3-5 橋梁檢測車可停靠距橋邊之距離

| 橋梁檢測車可停靠距橋邊之距離(公尺) |           |      |            |
|--------------------|-----------|------|------------|
| (橋護欄寬度以 0.5 公尺計)   |           |      |            |
| 第 3 臂組裝角度          | 油壓腳向車緣外伸出 |      | 油壓腳不向車緣外伸出 |
|                    | 15°       | 20°  | 25°        |
|                    | 尚不足 0.10  | 0.40 | 0.89       |
|                    |           |      | 1.45       |

橋梁檢測車可停靠距橋邊之距離經計畫期間之測試與前述計算，最大距離可達 1.45 公尺。

### 3.6 攝影機

民國 96 年所研發之橋梁檢測車採用惟迪電子<sup>[13]</sup>的室外型 22 倍星光級紅外線夜視 Speed Dome 攝影機，該攝影機在實驗室內沒有光源的環境下，調低照度後仍可以清楚顯現物體景像，再經室外橋檢車測試，其連續影像擷取之品質亦穩定且清晰，故本(97)年之橋梁檢測車亦採用該公司同類型產品，彩色 22 倍伸縮鏡頭紅外線攝影機 (VDI-22X-PTL) 如圖 3.38 所示。

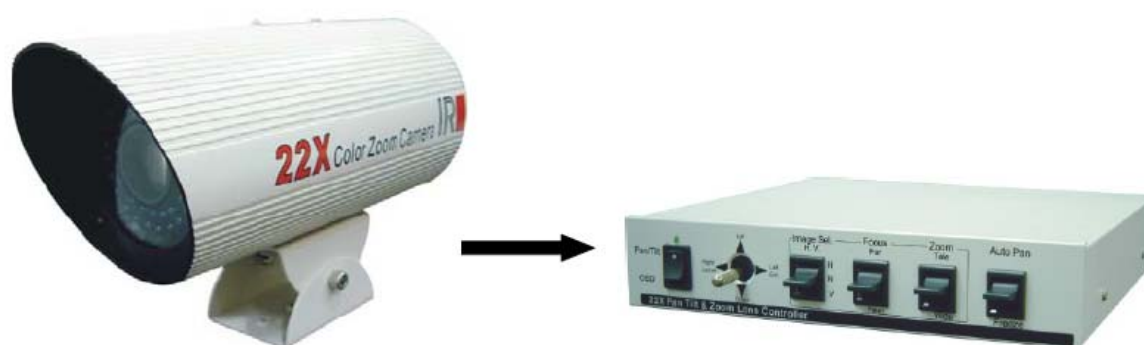


圖 3.38 彩色 22 倍伸縮鏡頭紅外線攝影機(VDI-22X-PTL)

攝影機之規格如

表 3-6 所列：

表3-6 彩色22倍伸縮鏡頭紅外線攝影機(VDI-22X-PTL)之規格

| VDI-22X-PTL | 規格   |
|-------------|--|
| 攝像元件        | 1/4" CCD 攝像元件  |
| CCD 有效圖素    | (NTSC):811(H) x 508(V), (PAL):795(H) x 596(V)            |
| 掃描系統        | (NTSC):525 lines,60 fields/秒,(PAL):625 lines,50 fields/秒 |
| SYNC 系統     | 內同步 / 外同步(垂直同步)  |

|            |  |
|------------|--|
| 最低照度       | 0.01 lux F1.2, 0 lux (IR 開啟), 星光級模式:0.002 lux F1.2     |
| 鏡頭         | 22 倍光學伸縮鏡頭, F1.6-3.8, f=3.7-85.1mm, IR Cut 濾片切換        |
| 電動伸縮/焦距/光圈 | 500,000 伸縮次數   |
| 伸縮鏡頭       | 22 倍光學 10 倍數位, 焦距:自動/手動                                |
| 解析度        | 480 條  |
| 雜訊比        | 52dB (MIN) / 60dB (TYP) (AGC OFF, r=1, APC OFF, Y-OUT) |
| 控制介面       | RS-232, RS-485 (選項功能), 位置: 64 區                        |
| 白平衡        | ATW/AWB/FIX (3200-9600°K) (無色滾動)                       |
| 自動背光補償     | 超級白平衡, 48 區自動背光補償                                      |
| 電子快門       | (NTSC)1/60-1/120,000 秒,(PAL):1/50-1/120,000 秒以上        |
| 視頻輸出       | 複合影像& Y/C 輸出 1.0Vp-p 阻抗 75 歐姆                          |
| 控制方式       | RS-232C & RS485 (驅動選項), OSD 控制                         |
| AGC/ALC 功能 | 自動(最大 18dB) / 自動或固定                                    |
| Gamma 修正   | 0.45   |
| 通訊數率       | 9600bps  |
| 負片/十字線功能   | 由 OSD 功能選項中設定  |
| 凍結功能       | 警報觸發或由 OSD 功能選項中設定                                     |
| 儲存溫度/操作溫度  | -30°C 至+60°C/ -20°C 至+50°C                             |
| 防水係數       | IP 66  |
| 紅外線 LED    | 45 個 850nm 紅外線 LED,壽命 6000 小時                          |
| 發射角度/光束角度  | 45° / 30°  |
| 紅外線距離      | 50 米   |
| 電源         | DC 12V 300mA(+/-10%), 紅外線: DC 12V 560mA                |
| 結構         | 高硬度鋁合金外殼,乳白色烤漆   |
| 尺寸/ 重量     | φ105mm x 250(L)mm / 2.5Kg (5.5 lb)                     |

### 3.7 與橋梁管理資訊系統之整合

計畫執行所開發之橋梁檢測軟體可儲存檢測作業時攝影機所錄製之影像檔，並可依需要定格單張擷取和儲存，再轉檔至橋梁檢測資料庫，如圖 3.39 所示，再將必要之資料上載至本所橋梁管理資訊系統。

圖 3.39 橋梁檢測資料庫

### 3.8 橋檢車設計規格及性能

橋檢車設計規格及性能綜整如表 3-7：

表3-7 橋檢車設計規格及性能

| 規格/性能                   |                 |
|-------------------------|-----------------|
| 檢測項目                    | 橋面下方之橋梁構件       |
| 操作人員                    | 具吊車操作手訓練合格證明    |
| 檢測橋面寬度                  | 12 公尺           |
| 作業時橋檢車停靠處(輪胎外緣)與橋邊之最大距離 | 1.45 公尺         |
| 作業環境                    | 4 級風以下          |
| 承載車輛                    | 3.5 噸小型貨車       |
| 機械手臂                    | 3 臂式            |
| 攝影機                     | 彩色 22 倍伸縮鏡頭具紅外線 |

## 第四章 橋梁檢測機械手臂實測

橋檢車實地檢測共計進行 3 次，前 2 次選擇在臺北縣翡翠水庫管制區內之一號橋，第 3 次則於外島澎湖跨海大橋實測。

### 4.1 翡翠水庫一號橋實測

翡翠水庫一號橋位於水庫管制區內，如圖4.1所示，因進出人車皆有管制，干擾極少，是極佳的測試地點。



圖 4.1 翡翠水庫一號橋

一號橋橋面為雙向2車道，護欄高度約120公分，寬度約40公分，如圖4.2所示。



圖 4.2 翡翠水庫一號橋護欄

➤ 定點檢測

橋檢車第1次實地定點檢測係於民國97年7月20日在翡翠水庫一號橋進行，實地檢測作業從停車、擺置路線變更警示措施、機械手臂第3臂各節接合、第2臂與3臂接合、安裝攝影機、安裝平衡配重塊、攝影機接線、機械手臂操作、將攝影機深入橋面下進行拍攝等各動作依序如圖4.43至圖4.11所示。





圖 4.3 路線變更警示措施

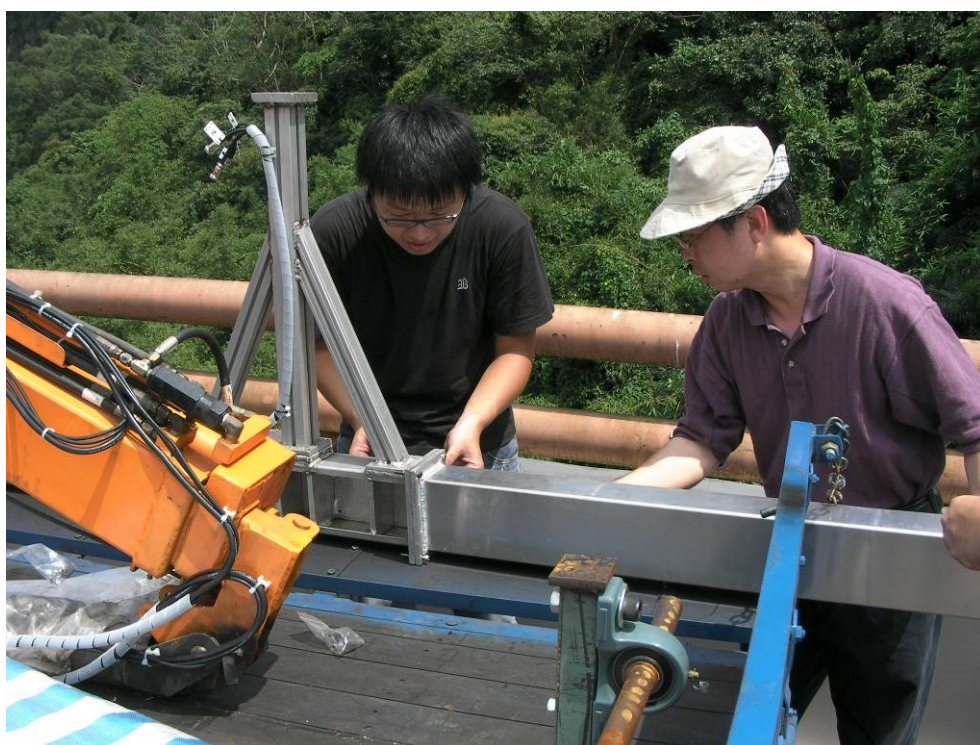


圖 4.4 機械手臂第 3 臂各節接合



圖 4.5 機械手臂第 2 臂與第 3 臂接合

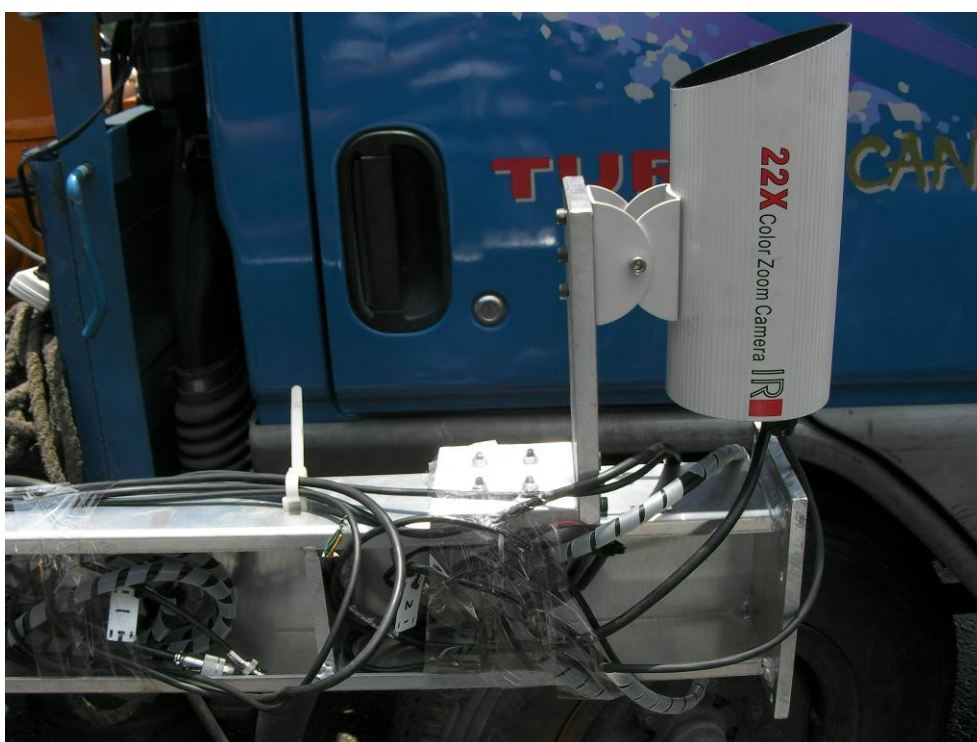


圖 4.6 機械手臂第 3 臂安裝攝影機





圖 4.7 機械手臂第 3 臂安裝平衡配重塊



圖 4.8 檢測車攝影機接線





圖 4.9 機械手臂操作

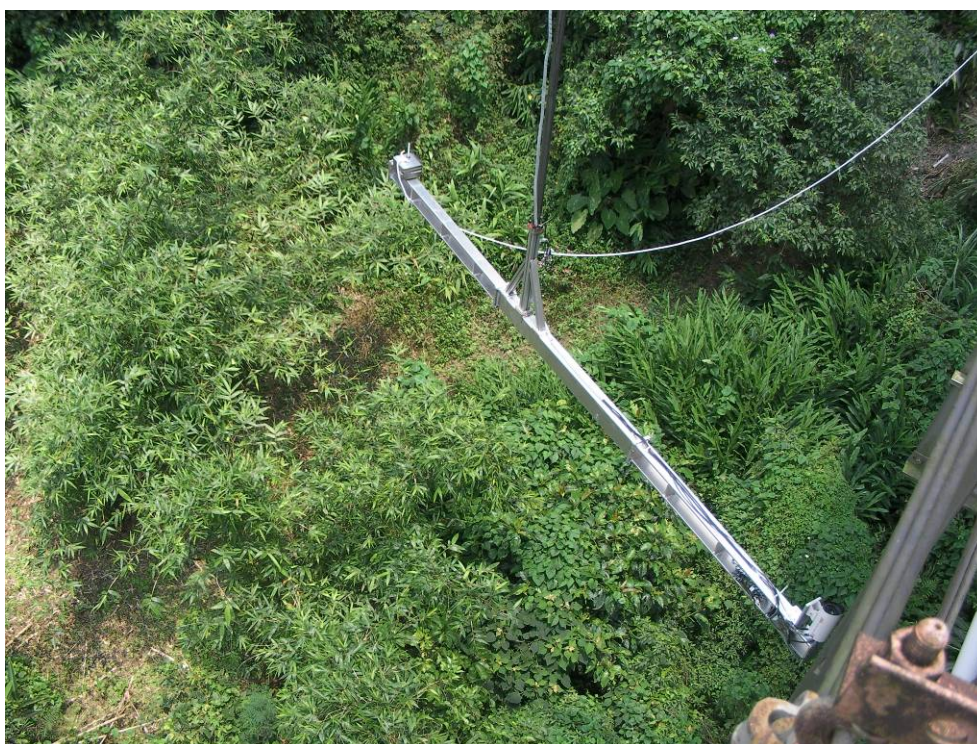


圖 4.10 機械手臂第 3 臂迴轉



圖 4.11 機械手臂附載之攝影機深入橋面下

實測之初以3公尺長之第3臂附載4公斤之配重塊取代攝影機，先測試機械手臂之運作，確認可正常安全運作後，再改以附載攝影機實際操作，並進行拍攝作業。拍攝影片經每秒1次之畫面擷取，結果如圖4.13所示。



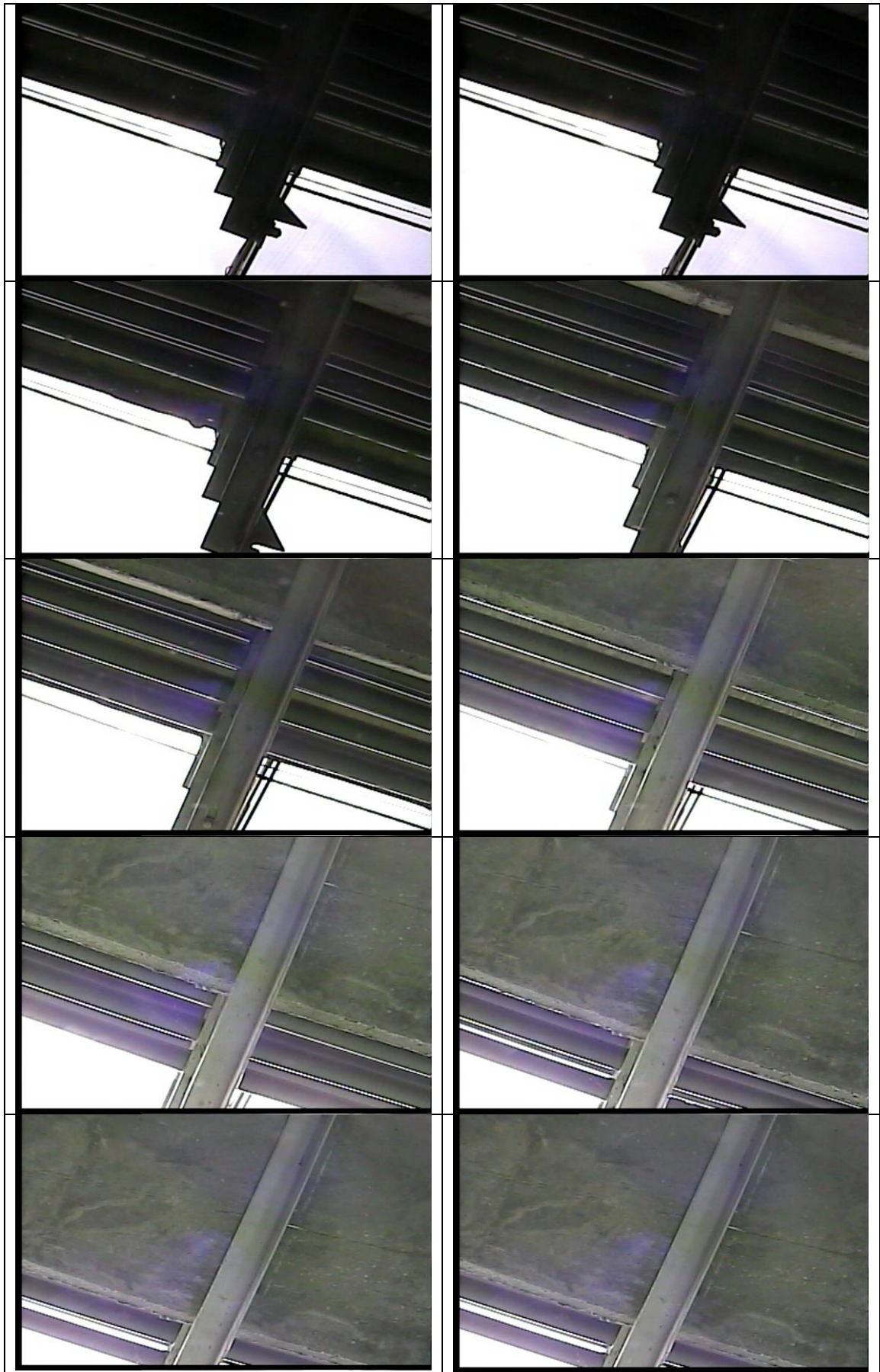


圖 4.12 定點檢測之攝影畫面

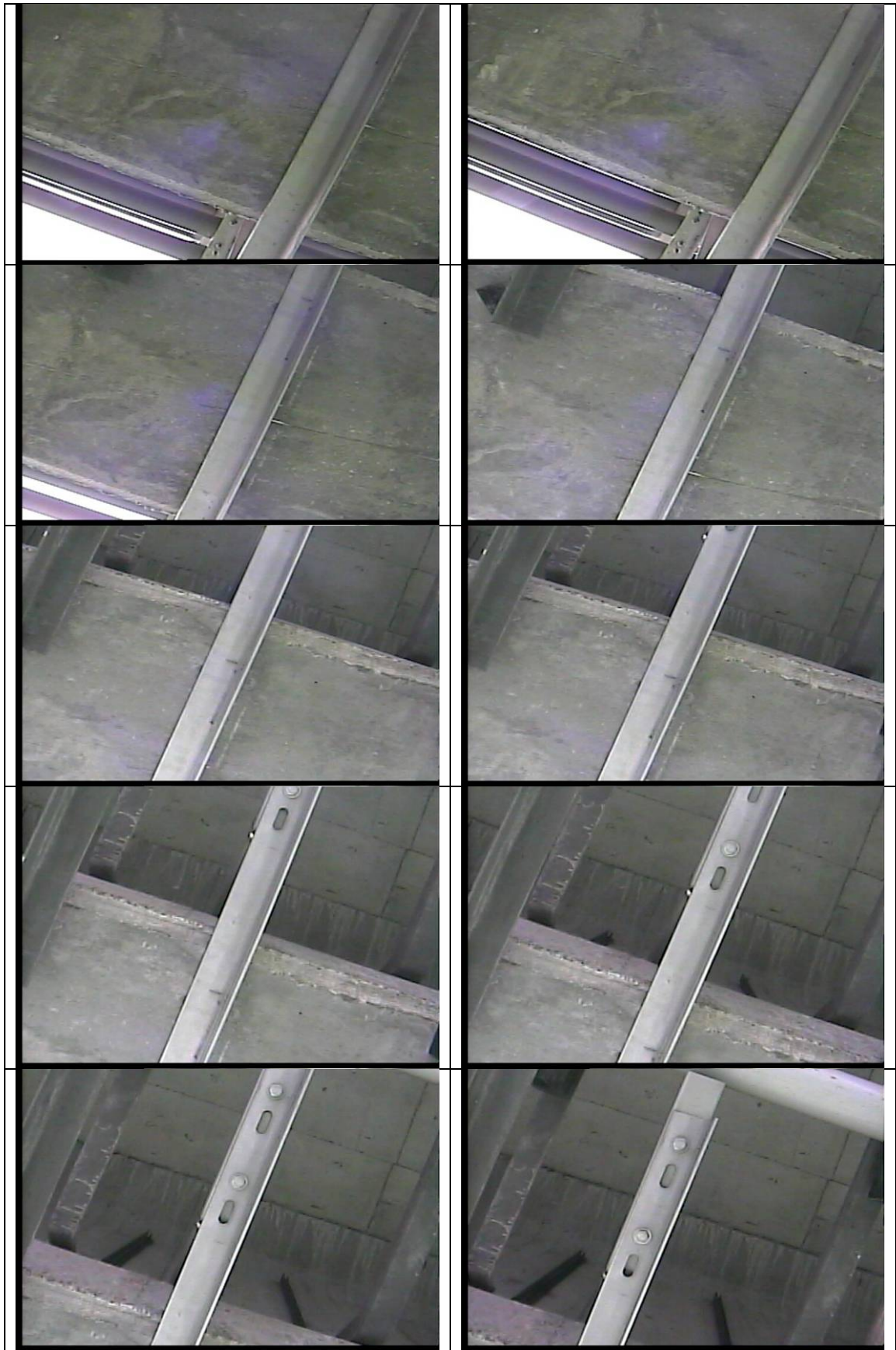


圖 4.13 定點檢測之攝影畫面(續)



第 1 次實地測試後之檢討如下：

1. 機械手臂第 2 臂與第 3 臂之接合應改進，以節省前置作業時間。
2. 定製工作平台，方便第 3 臂各節之接合，節省前置作業時間。
3. 加裝小型攝影機，監控橋面下狀況。
4. 考慮取消平衡配重塊，另設計機構吊掛第 3 臂末端以保持平衡。
5. 機械手臂第 3 臂可進一步測試 6 公尺長臂之操作。
6. 機械手臂操作步驟應標準化。

民國97年7月26日，橋檢車於翡翠水庫一號橋進行第2次實地檢測，為檢討改良前次實地檢測缺失後之測試。機械手臂第2臂與第3臂接合改進設計之快速接頭及工作平台、第3臂附加之小型攝影機、吊掛第3臂末端保持平衡之機構、攝影機、以6公尺長第3臂之操作測試等如圖4.14至圖4.18所示。



圖 4.14 檢測車機械手臂第 2 臂與第 3 臂接合之快速接頭及工作平台





圖 4.15 機械手臂第 3 臂附加之小型攝影機



圖 4.16 吊掛第 3 臂末端保持平衡之機構





圖 4.17 機械手臂附載之攝影機

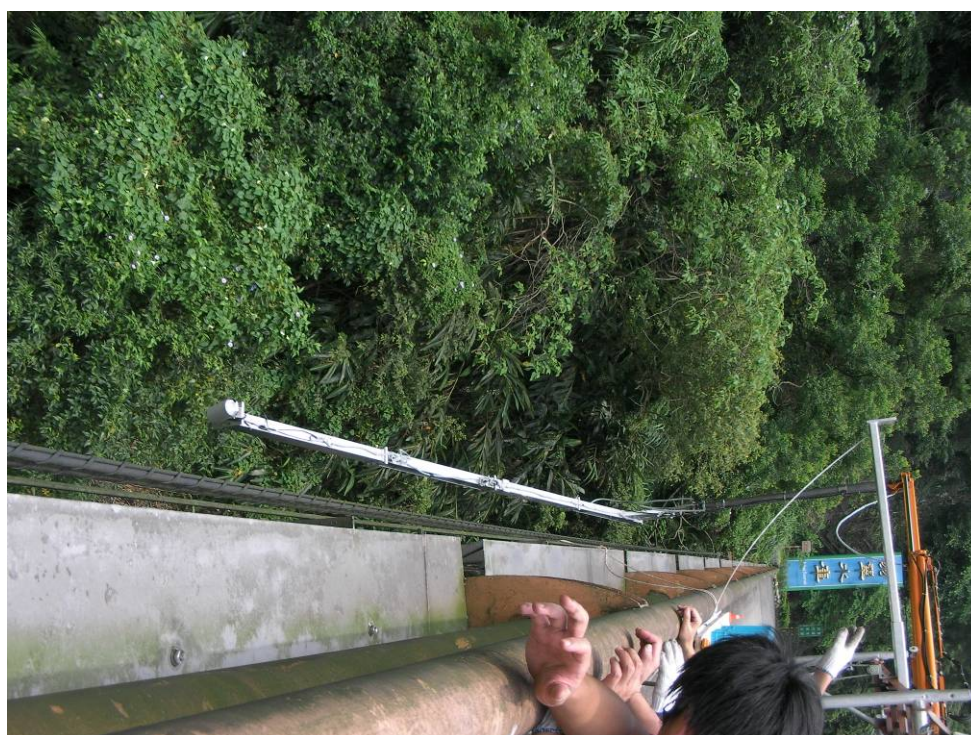


圖 4.18 機械手臂以 6 公尺長且無平衡配重塊方式操作

第 2 次實地檢測是以 6 公尺長之第 3 臂附載攝影機進行測試及拍攝。第 2 次實地測試後之檢討如下：

1. 取消平衡配重塊，吊掛第 3 臂末端保持平衡之機構須再改進設計。
2. 配合機械手臂標準操作步驟及前述吊掛第 3 臂之機構，應另定製工作平台，方便第 3 臂各節之接合，節省前置作業時間。

此外，由於一號橋橋面沒有人行道，故人行道此車道之高度和距護欄邊之寬度對檢測作業的影響在這 2 次實地檢測中無從探討，但仍將列入設計考量以滿足各種作業環境之可能性。

#### ➤ 動態檢測

本研究於民國 97 年 7 月 26 日第 2 次在翡翠水庫一號橋進行實地檢測之最後階段，測試動態橋梁檢測之可行性及攝影品質。動態橋梁檢測是指橋檢車並非停留於定點不動，而是動態前進狀況下，攝影機隨橋檢車前進時同步進行拍攝工作。

測試時，配合橋檢車之前進，兩側之油壓支撐腳均收起，橋檢車因受機械手臂力矩作用稍呈傾斜，但前進過程中 4 輪仍能保持著地，穩定地前移。動態檢測的攝影經畫面擷取，如圖 4.19 所示。

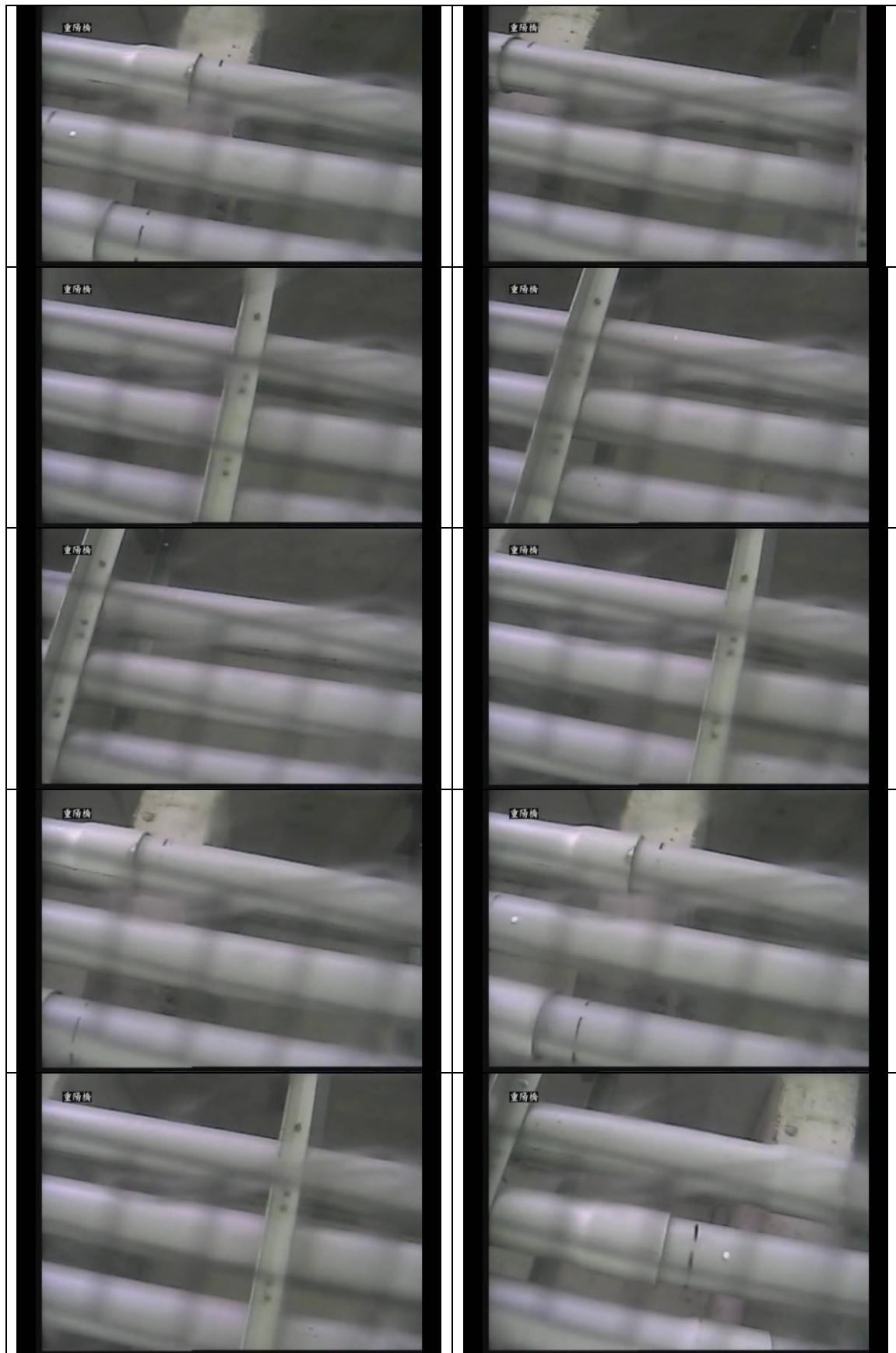


圖 4.19 動態檢測之攝影畫面



## 4.2 澎湖跨海大橋實測

橋檢車第3次實地檢測係於民國97年8月19日在外島澎湖跨海大橋進行，如圖4.20所示。



圖 4.20 橋檢車於跨海大橋前

澎湖跨海大橋為雙向2車道之橋梁，車道旁並有人行道，如圖4.21所示。跨海大橋之人行道寬1.23公尺，此外，橋護欄附加水銀燈之寬度為0.47公尺。基本上，橋檢車作業時車輪外緣還會與人行道保持部份距離，因此橋檢車作業停靠處與橋護欄內緣之實際距離約1.5公尺，此距離略大於3.5節所述規格，增加操控之難度。執行檢測作業時，車輛後方有擺設安全錐，並由公路總局澎湖工務段橋檢人員協助安全維護及指導橋檢作業，如圖4.22所示。



圖 4.21 澎湖跨海大橋橋面



圖 4.22 執行檢測作業時之車道安全措施

機械手臂及攝影機組裝如圖4.23及圖4.24所示，組裝完成後即操控機械手臂，將第3臂及其所承載之攝影機移出橋護欄外，並下降至預定深度，如圖4.25及圖4.26所示，接著迴轉機械手臂，如圖4.27所示，使攝影機深入橋面下進行拍攝工作，惟於此時，導引第2臂第2、3節伸縮之導槽銅柱斷裂，攝影機無法繼續深入橋面進行拍攝。



圖 4.23 機械手臂組裝



圖 4.24 攝影機組裝





圖 4.25 操控第 3 臂及所承載之攝影機移出橋護欄外



圖 4.26 操控第 3 臂下降至預定深度





圖 4.27 迴轉機械手臂使攝影機深入橋面下進行拍攝工作

研究團隊立即至澎湖當地之小型鐵工廠，嘗試以螺絲暫時取代，同日下午再接續執行測試工作。機械手臂再經組裝、跨越橋護欄(如圖4.28所示)、下降至檢測深度，及至迴轉機械手臂(如圖4.29所示)使攝影機深入橋面下進行拍攝時，導引第2臂第1、2節伸縮之導槽銅柱再次斷裂，攝影機無法繼續深入橋面下，本次測試宣告失敗。



圖 4.28 第 2 次測試(1)



圖 4.29 第 2 次測試(2)

### 4.3 橋檢車設計修正改進驗證

澎湖跨海大橋測試作業後，本研究針對機構設計及檢測程序缺失進行修正後，於民國97年10月31日在樹林市塔寮坑溪堤岸邊進行修正改進後之驗證。驗證項目包括：

1. 第2臂導槽銅柱之設計改進
2. 橋檢車作業停靠點與橋護欄之間隔距離
3. 第3臂吊繩/平衡塊

第2臂導槽銅柱之設計原為8公釐直徑之圓柱，自機械手臂4月中旬組裝測試，至8月中旬赴澎湖跨海大橋進行實地測試近4個月過程中，其間大小規模測試不斷，至澎湖測試時斷裂。為此，研究團隊針對銅柱進行設計改進，採立方體銅柱，如圖4.30所示，矩形截面積尺寸11公釐 × 16公釐，強度計算詳3.4.1節。

橋檢車作業停靠點與橋護欄間隔距離如3.5節所述，以1.45公尺為限，故測試時車輛停靠，輪胎外緣距橋護欄以1公尺距離為基準。

測試時，先以不附加配重塊進行操作測試，機械手臂組裝後如圖4.31所示，組裝後即操控機械手臂第1臂上抑、迴轉，至第3臂跨越橋護欄並與之平行，如圖4.32所示，其間之操控經測試，動作完全連貫無礙。機械手臂第2臂之操控以鋼索下放，下放時配合掛勾於第3臂前端之吊繩輔助，減輕第3臂自重及承載重對第2臂造成之力矩，即能順利延伸第2臂，將第3臂下降至預定深度。





圖 4.30 立方體銅柱



圖 4.31 不附加配重塊進行機械手臂組裝

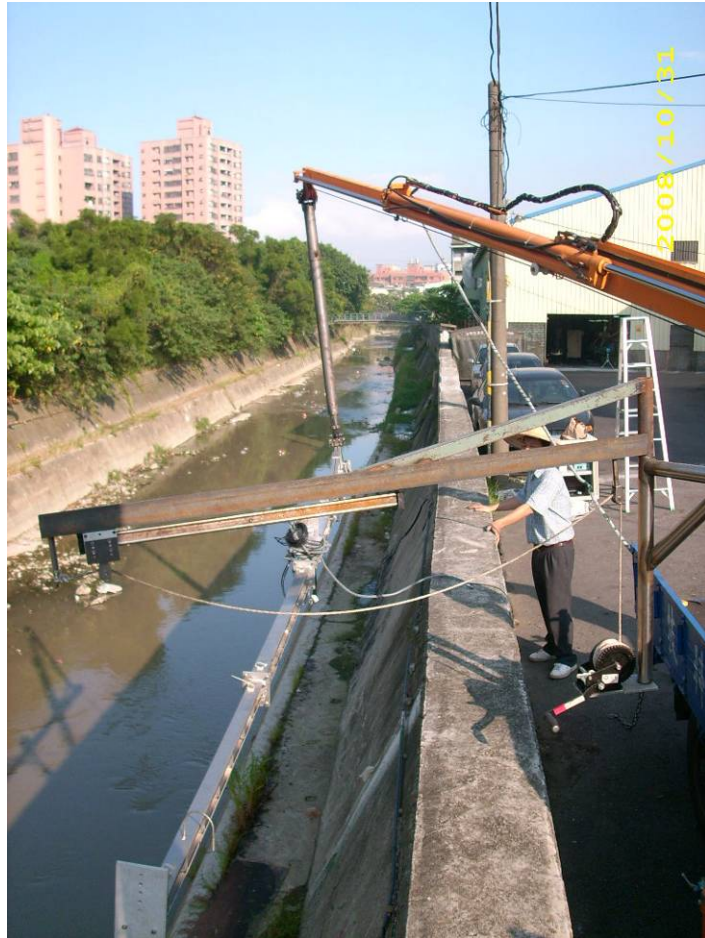


圖 4.32 第 3 臂跨越橋護欄並與護欄平行

其後測試附加配重塊之操作，並嘗試調整配重塊重量及擺放位置。配重塊分別置於距第2臂1.7公尺及2.7公尺之組裝如圖4.33及圖4.34所示。附加配重塊並不影響機械手臂第1臂之操控，組裝後同樣操控機械手臂第1臂上抑、迴轉，至第3臂跨越橋護欄並與之平行，如圖4.35所示，其間之操控經測試，動作亦可完全連貫無礙。機械手臂第2臂之操控以鋼索下放，由於附加了配重塊故不需掛附於第3臂前端之吊繩。測試不同配重塊重量及擺放位置對延長第2臂的效果，操作結果以配重塊距第2臂1.7公尺、配重20公斤及2.7公尺、配重10公斤時可順利延伸第2臂，可配重塊對第2臂的平衡力矩約需36公斤-公尺。減輕第3臂自重及承載重對第2臂造成之力矩，即能順利延伸第2臂，將第3臂下降至預定深度，如圖4.36所示。





圖 4.33 配重塊距第 2 臂 1.7 公尺之組裝



圖 4.34 配重塊距第 2 臂 2.7 公尺之組裝





圖 4.35 附加配重塊之第 3 臂跨越橋護欄並與之平行

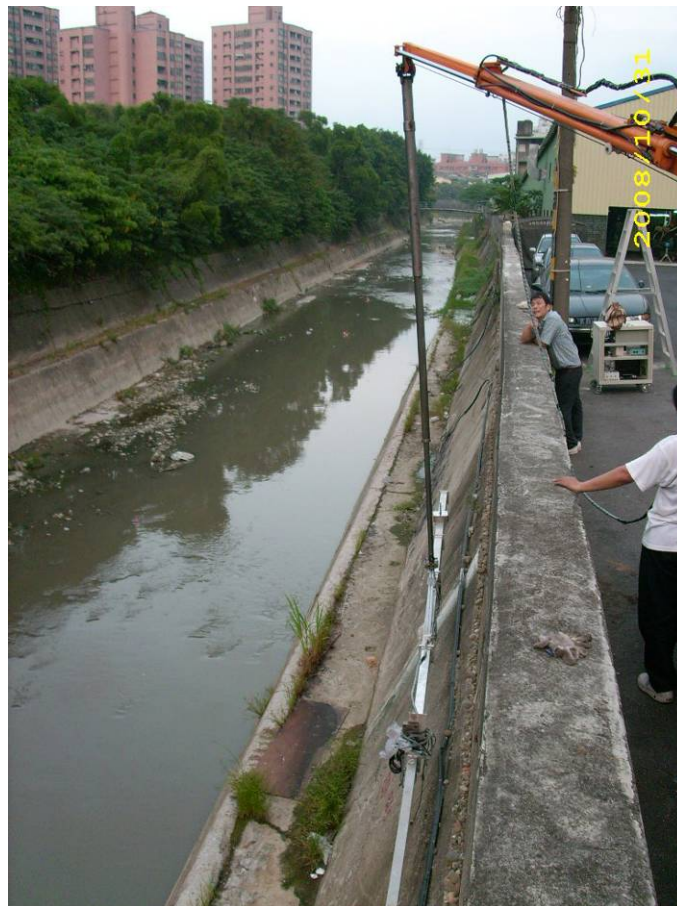


圖 4.36 附加配重塊之第 3 臂下降至預定深度

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

1. 本計畫研究開發之橋梁檢測機械手臂是以小型貨車(3.5 公噸以下，駕駛人可持小型車普通駕照)為機械手臂載臺，採 3 臂式機械手臂，附載 2 個紅外線 CCD 攝影機，同步拍攝及傳輸影像給檢測人員，以輔助傳統由檢測人員直接深入橋面下執行目測的方式，降低執行檢測作業之風險。
2. 機械手臂拍攝所得之影像可視需要記錄存檔，並上傳至橋梁管理資訊系統，完整記錄檢測作業。
3. 計畫執行期間，橋梁檢測機械手臂曾分別於翡翠水庫一號橋進行 2 次測試及澎湖跨海大橋進行 1 次測試，並於塔寮坑溪堤岸邊進行數次之修正驗證測試，證實機械手臂檢測作業之可行。
4. 本計劃研發成果與營建署在 89 年所發展之車載機械手臂橋梁檢測車相較，除將 6 噸之中型貨車改為 3.5 噸小型貨車，總重 922 公斤之機械手臂減重至 448 公斤，增加橋檢車之機動性及操作便利性外，能檢測橋面之寬度亦由 4 公尺增至 6 公尺，大幅提升檢測範圍。

### 5.2 建議

橋梁檢測機械手臂之開發經不斷設計修正及測試，已累積相當經驗，針對未來可改善之處建議如下：

1. 克服人行道之限制。

橋檢車因作業安全所需而使用油壓支撐腳，但當檢測有人行道之橋梁時，即受限於支撐腳致橋檢車無法緊靠橋緣，使機械手臂的適用範圍連帶受限。未來可改裝油壓支撐腳，使之能置放於人行道上，則橋檢車可再往橋緣處靠近，增加機械手臂的適用性。

2. 縮短機械手臂組裝時間



橋檢車機械手臂第 3 臂目前是採分段式，於檢測前再以螺絲組裝上鎖。未來第 3 臂可採折疊式，執行檢測作業時將之展開，再扣上扣環，即可大量減少組裝時間。此外，攝影機與第 3 臂之接合安裝，亦可考慮插入式安裝，再以扣環扣上，可免除鎖螺絲耗時的現況。

### 3. 機械手臂第 2 臂減重及加長

本(97)年橋梁檢測機械手臂第 2 臂為 3 節式套管設計，每節長 1.5 公尺，各節套管厚度自最外層之第 1 節至最內層之第 3 節分別為 3.5 公釐、5 公釐、4 公釐，而未來可再尋求更適當厚度之套管以減重。此外，亦可配合檢測橋面下深度之需求，加長各節套管之長度。

### 4. 攝影機輕量化

本(97)年所選用之彩色 22 倍伸縮鏡頭紅外線攝影機(VDI-22X-PTL)雖功能齊全、符合檢測需求，但單機仍有 2.5 公斤重。2 具攝影機對機械手臂第 2 臂所產生之力矩仍有相當程度影響。未來隨電子相關技術之發展，應可選用更輕巧又具相同功能之攝影機，則機械手臂之設計將更具彈性。

## 參考文獻

- [1] 周健捷、蔣偉寧、唐治平、董必正，機械手臂技術與橋梁結構安全檢測之應用，內政部營建署，2000 年 12 月。
- [2] Hydra Platforms Manufacturing, <http://www.hydraplatform.com/home.asp>
- [3] Aspen Aerials, <http://www.aspenaerials.com/index.htm>
- [4] Moog, <http://www.moog-online.de/eingange.htm>
- [5] N. E. Bridge Contractors, Inc., <http://www.bridgeriggers.com/prod03.htm>
- [6] Facelift, Inc.,  
<http://www.facelift.co.uk/piclibrary/?machine=&category=&location=&jobused=&start=81>
- [7] Serpentine Robot, [http://www.ri.cmu.edu/projects/project\\_222.html](http://www.ri.cmu.edu/projects/project_222.html)
- [8] LCPC,  
[http://www.lcpc.fr/fr/presentation/organigramme/div\\_mi/recherche/theme/axe4.php](http://www.lcpc.fr/fr/presentation/organigramme/div_mi/recherche/theme/axe4.php)
- [9] Aerial Platform System for Bridge Inspection,  
<http://www.tfhr.gov/pubrds/winter95/p95wi26.htm>
- [10] JLN Labs, <http://jnaudin.free.fr/uav/qro/qromission1.htm>
- [11] 交通部運輸研究所，2007，橋梁檢測機械手臂研發計畫。
- [12] 力有機械企業社，  
<http://tw.ttnet.net/ttnet/gotoprd/MA356/020/0/944303134353334353.htm>
- [13] 惟迪電子股份有限公司，<http://www.vdicctv.com/>

## 附錄 1：期中報告審查意見表

### 交通部運輸研究所合作研究計畫

#### ☒期中 ☐期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：交通設施營運維護效能提昇計畫—橋梁檢測機械手臂研發進階計畫

執行單位：大同大學

| 參與審查人員<br>及其所提之意見   | 合作研究單位<br>處理情形  | 本所計畫承辦<br>單位審查意見 |
|---|---|------------------|
| <b>(一) 邱求慧委員</b>  |   |                  |
| 1. 政府專案報告通常列出專案進度、經費使用、查核點等資訊以利查核，本案之期中報告是否需將這些資訊納入？                                  | 1. 專案進度、經費使用、查核點等資訊均詳列於每月之工作紀錄，並送交運研所核備列管，因此期中報告內容不再重覆納入。   | 同意               |
| 2. 結構分析是否以最初設計版本為對象？機械手臂為動力的操作，過程中還有風力與其他外力影響，故設計應一併考量動力與靜力；且單以靜力分析所得安全係數僅 1.6，似乎也太低。 | 2. 期中報告中之結構分析是以初步設計版本為對象，確保結構之安全。期末報告內會將初步設計及其後的減重設計完整呈現，探討減重設計之效益及安全性。風力及動力之影響納入期末報告之分析，安全係數將以「移動式起重機安全檢查構造標準」為規範。 | 同意               |
| 3. 配重塊的設計目的為何？去掉配重塊後的影響如何？  | 3. 配重塊之設計目的在平衡因機械手臂第 3 臂自重及承載重量對第 2 臂所造成之力矩，使第 2 臂之升降更順利。橋檢車無配重塊之設計時則另增加第 3 臂吊掛機構以吊索輔助吊住第 3 臂來減少力矩。                 | 同意               |
| 4. 以本計畫所開發之機械手臂進行橋梁檢測，其效益應如何驗證或評估？  | 4. 以本計畫所開發之機械手臂是以能否用 3.5 噸以下小型貨車執行橋梁檢測工作，並能取得清晰之檢測照片為驗證。檢測人員不用親自深入橋面下所得到之安全保障即為本計畫之最大效益。                            | 同意               |

| <b>(二) 高崇洋委員</b>  |  |    |
|---|--|----|
| 1. 各階段的審查意見，是否能呈現在報告中？  | 1. 遵照辦理，期中審查意見及回覆將列於期末報告中。   | 同意 |
| 2. 按目前機械手臂設計架構，尚不屬於勞工安全衛生檢查範圍，但 3 噸以下仍應有自動檢查表，建議要查閱勞工安全設施規則等相關規定提供予運研所，並參考危險性機械設備強度計算書，附上強度計算資料，其內容含風力、鋼繩、掛勾等強度之計算...等。 | 2. 遵照辦理，機械手臂之設計參考「移動式起重機安全檢查構造標準」之規範，其強度計算基準相關資料納入期末報告中。安全檢查則參考「危險性機械及設備安全檢查規則」所列之附表 18「定期檢查結果報告表」提供給運研所作為自我檢查之規範。 | 同意 |
| 3. 後續移轉軟硬體時，應注意軟體架構及使用方便性，並建議於期末加以展示。   | 3. 本計畫是開發一橋梁檢測機械手臂，計劃執行重點在概念設計，並藉由實際檢測工作以進行可行性研究，因此無軟硬體移轉。檢測設備在開發及實際檢測階段即邀請現場檢測作業人員參與並提供意見，讓檢測設備之開發更具操作便利性。        | 同意 |
| 4. 建議期末時提供操作 SOP、設備操作之限制條件、設備功能及規格表等。   | 4. 遵照辦理，設備操作標準程序，及設備功能、規格、限制等相關資料補充於期末報告。  | 同意 |
| <b>(三) 鄧文廣委員</b>  |  |    |
| 1. 報告中部份文字及橋梁破壞案例宜再斟酌，如 1.1 節：美國明州 I-35W 大橋斷裂肇因為「金屬疲勞」、颱風大量降雨造成「土石流」等文字，請修正。  | 1. 遵照辦理，期末報告內修正。   | 同意 |
| 2. 報告中提及橋梁單邊檢測時以 7.5 公尺為目標，建議無須強調車道種類、車道數，直接說明實際可量測寬度即可。  | 2. 遵照辦理，期末報告內修正。   | 同意 |
| 3. 報告中提到「小型貨車承載機械手臂配置紅外線 CCD 攝影機，來『取代』傳統上人員執行目視檢測」，修正為「輔助」較妥當。  | 3. 遵照辦理，期末報告內修正。   | 同意 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 4. 計畫是用 3.5 噸以下車輛設計承載機械手臂，此設計可用的最小車款為何？      | 4. 本計畫所開發之機械手臂可由 1000cc 以上小貨車承載，並由車輛本身提供機械手臂操作時所需之動力，但考慮操作時之安定度，則承載車輛應具有足夠之自重以避免發生傾覆之危險，承載車輛仍以 3.5 噸貨車為宜。 | 同意 |
| 5. 機械手臂與車載台的連接安全性應在期末報告中加以分析。                | 5. 遵照辦理，結合橋梁檢測機構與車身大梁的聯結栓之安全性依「移動式起重機安全檢查暫用構造標準」訂定之規範要求進行分析，相關內容補充於期末報告中。                                 | 同意 |
| 6. 機械手臂對橋檢車之最大傾覆力矩計算上，第 3 臂重量對橋檢車之傾覆影響為何？    | 6. 第 3 臂自重及承載重量分佈對橋檢車之傾覆影響探討，相關內容補充於期末報告中。  | 同意 |
| 7. 針對一般混凝土橋梁之檢測時，機械手臂第 2 臂長度是否足夠將 CCD 深入橋面下？ | 7. 依本計畫現行規劃設計之橋梁檢測機械手臂，其第 2 臂能將 CCD 深入橋面下 2.2 公尺，而後續之設計可以再將第 2 臂予以加長。                                     | 同意 |
| 8. 結構鋼型號為何？建議應列出相關資料，另安全係數 2 以上較為安全。         | 8. 結構鋼型號為 STPG38，機械手臂結構經減重設計後安全係數提升至 2.15。  | 同意 |
| 9. 一般 3.5 噸車並無油壓支撐腳機構，未來在交車時如何處理？            | 9. 本計畫是開發一橋梁檢測機械手臂，計畫執行重點在概念設計，並藉由實際檢測工作以進行可行性研究，因此無軟硬體移轉及交車。   | 同意 |
| 10. 未來在攝影機之功能提升上，可考慮影像定位系統，對橋梁之檢測較有幫助。       | 10. 敬悉，影像定位系統列為未來開發檢測設備之需求考慮。   | 同意 |
| <b>(四) 陳松堂委員</b>                             |   |    |
| 1. 油壓設備建議納入報告中。                              | 1. 遵照辦理，油壓設備相關內容補充於期末報告中。   | 同意 |
| 2. 操作人員之操作是否需執照？                             | 2. 檢測設備操作人員依勞工安全衛生教育訓練規則第 13 條：吊升荷重未滿 3 公噸移動式起重機操作人員、使用起重機具從事吊掛作業人員，應接受特殊作業                               | 同意 |

|   |  |    |
|---|--|----|
|   | 安全衛生教育訓練。  |    |
| 3. 橋梁檢測實務操作是否有辦講習訓練？  | 3. 經計畫執行確認橋梁檢測機械手臂實際執行檢測成效後，未來即可建構橋梁檢測能量，並為檢測作業單位辦理操作訓練講習。             | 同意 |
| 4. 橋梁檢測機械手臂之使用範圍及限制，建議予以說明，另第3臂可否伸縮？                                  | 4. 遵照辦理，橋梁檢測設備之使用範圍、規格、限制等相關資料補充於期末報告。                                 | 同意 |
| 5. 橋梁中之大梁兩側應如何檢測？   | 5. 橋梁中之大梁兩側邊的檢測須控制第2臂之伸縮而使攝影機升降至貼近橋面處，再搭配選用具180°自動翻轉功能之攝影機鏡頭。          | 同意 |
| 6. 第21頁，機構平衡分析，除考慮彎矩應力外，應考量靜力及動力之合成應力（彎矩 moment、扭力 torsion、剪力 shear）。 | 6. 遵照辦理，機械手臂操作安定度及機構平衡分析參卓「移動式起重機安全檢查暫用構造標準」之規範，相關內容補充於期末報告中。          | 同意 |
| 7. 第4頁，研究計畫內容及工作項目「3.完成上述開發橋梁目視檢測機構之有限元素結構應力分析，以評估結構安全」，請敘明其原理及目前進度。  | 7. 期中報告已就機械手臂結構進行有限元素法之靜態應力分析，期末報告將再加入動態及風力影響分析。                       | 同意 |
| 8. 橋梁檢測系統如何看出裂縫？  | 8. 檢測人員透過橋梁檢測系統之攝影機觀察檢測範圍，並同步進行拍攝錄製存檔，以進行後續分析。                         | 同意 |
| 9. 本計畫之橋檢設備重達600kgf以上，需固定於貨車始能操作，橋梁檢測系統是否需另備車輛？                       | 9. 橋梁檢測系統裝置於機櫃內，一併置於車內。  | 同意 |
| 10. CCTV 監測有無望遠功能？能否任意角度觀測？能否有效正視構造物表面？                               | 10. 本計畫所規劃採用之攝影機為室外型、具22倍伸縮鏡頭之攝影機，能有效正視構造物表面。                          | 同意 |
| 11. 建議考量探照（明）設備，俾利檢測之進行。  | 11. 本計畫所規劃採用之攝影機為紅外線夜視攝影機，經實驗室內測試，在沒有光源的環境下，調低照度後仍可以清楚顯現物體景像，可以滿足檢測要求。 | 同意 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 12. 本計畫橋檢設備僅針對 20m 寬以下橋梁，全省尚有約 10%橋梁寬在 20m 以上而無法使用，能否研議增長之可行性。 | 12. 敬悉，未來研究可規劃以 3.5 噸以上大型貨車作為承載車輛，即可設計加長型之機械手臂。   | 同意 |
| 13. 本計畫橋檢實測結果之成果分析（如裂縫寬度、安全性）請補述。                              | 13. 橋檢實測結果之成果以所拍攝之影像呈現，由影像之清晰度為積效，藉以評估本計畫執行之可行性。經檢視由翡翠水庫一號橋所得之影像，從清晰的照片上並未發現裂縫產生，所以就其所檢測的橋梁部份來說，是安全的。 | 同意 |
| 14. 本計畫橋檢設備採用之鋼材甚重，有無考量其他高強度輕質材料，以減輕重量。                        | 14. 機械手臂第 3 臂採用鋁合金板以減輕重量，同時，計畫執行後期擬再進一步進行減重設計。前後設計之重量比較、強度分析等相關資料，納入期末報告中。                            | 同意 |
| 15. 本案橋梁檢測機械手臂之研發目的係為檢測橋梁是否安全，故宜先敘明可檢測之項目及如何判讀其安全性。            | 15. 遵照辦理，橋梁檢測機械手臂之可檢測項目、功能、規格、限制等相關資料補充於期末報告。   | 同意 |
| <b>（五）林清洲委員</b>  |   |    |
| 1. 第 21 頁，橋梁檢測機械手臂操作平衡安全計算之最大傾覆力矩是否有更大之傾覆力矩可能(如第 3 臂平行橋梁方向時)？  | 1. 依本計畫所規劃設計之標準操作程序作業，當第 3 臂平行橋梁方向時，由於第 1 臂向外斜出，並不是由橋檢車側邊垂直伸出，因而不是最大傾覆力矩之時。其他可能造成最大傾覆力矩之分析，補充於期末報告。   | 同意 |
| 2. 進行現地測試時，建議搭配橋檢人員，以得知其橋檢需求。                                  | 2. 遵照辦理，澎湖跨海大橋檢測時將會同澎湖工務段橋檢人員進行。  | 同意 |
| 3. 攝影機視野是否有太小的情形？以致檢查構件不易定位且不易記錄實際橋梁構件情況？又是否會有視野死角(如構件側面)？     | 3. 攝影機具備 22 倍光學伸縮鏡頭，可以視需求調整檢視範圍。構件側面之檢視可以考慮另一型式具鏡頭自動翻轉功能之攝影機。   | 同意 |
| 4. 橋面若有人行道情形宜考量。   | 4. 橋面若有人行道，則橋檢車將無法緊靠橋邊護欄，並影   | 同意 |

|   |   |    |
|---|---|----|
|   | 響所能檢測的橋寬。橋檢車規格中將列出作業時距橋邊最大停靠距離。   |    |
| 5. 機械手臂拆裝一次之時間約為何？(若遇橋面有電桿，則此因素對橋檢效率有影響)                                  | 5. 機械手臂拆裝是影響檢測作業效率的最大因素，因此開發過程中不斷尋求改進。一方面進行快速組裝機構之設計，另一方面則進行折疊/展開式機構設計，最後依本計畫內最終版本測定。 | 同意 |
| 6. 第5章後續工作要進行澎湖跨海大橋實地檢測，因澎湖跨海大橋情況較特殊，可能困難度較高，尤要考慮風力的影響，建議另擇本島較有代表性橋梁進行檢測。 | 6. 敬悉。  | 同意 |
| <b>(六) 主席結論：</b>  |   |    |
| 1. 機構運動安全性為計畫管控重點，請研究團隊特別留意。  | 1. 敬悉，進一步之操作安全及結構安全分析補充於期末報告。   | 同意 |
| 2. 在較嚴苛的環境中測試，是希望能得到更多相關影響資訊。   | 2. 敬悉，嚴苛環境中測試所突顯之問題即是設計上不易看到的缺失，更可以藉此改進，讓設計及規劃更完整。                                    | 同意 |
| 3. 此計畫經費不多，也無設備移轉問題，主要是在檢驗概念設計，將來確認可行，將以公路總局為標的。                          | 3. 敬悉。  | 同意 |
| 4. 對於攝影機的缺失，目前還有其它構思，未來可能會在計畫中持續測試。                                       | 4. 敬悉。  | 同意 |
| 5. 計畫目前已有初步成果，近期將到澎湖做測試，審查會議中提及之意見與建議，於澎湖測試後，問題會更為清楚。                     | 5. 敬悉，澎湖測試後之問題及改善納入期末報告。  | 同意 |
| 6. 請研究單位針對各委員所提之建議事項做回應與修正，並列入期末報告中。                                      | 6. 敬悉。  | 同意 |
| 7. 要謝謝各位委員的參與，這也是研究團隊進步的力量。本期中報告審查通過。                                     | 7. 敬悉。  | 同意 |
| <b>(七) 散會</b>   |   |    |



## 附錄 2：期末報告審查意見表

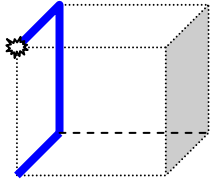
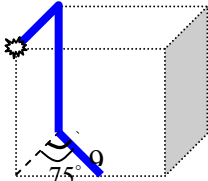
### 交通部運輸研究所合作研究計畫

#### ☐期中☒期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：交通設施營運維護效能提昇計畫－橋梁檢測機械手臂研發進階計畫

執行單位：大同大學

| 參與審查人員<br>及其所提之意見   | 合作研究單位<br>處理情形  | 本所計畫承辦<br>單位審查意見 |
|---|---|------------------|
| <b>(一) 林清洲委員</b>  |   |                  |
| 1. 報告中機械手臂之操作程序以條文式呈現，建議改以照片輔助，讓檢測人員較容易了解，並製成操作指南光碟以方便讀取和保存。    | 1. 遵照辦理。機械手臂操作指南光碟附加於結案報告後，以利橋檢工作人員審閱。  | 同意               |
| 2. 報告中未說明機械手臂之組裝、操作所需時間。  | 2. 以橋檢工作在澎湖實測之紀錄觀察，由工作錄影的時間顯示，機械手臂之組裝可在 30 分鐘內完成，而隨著熟練度增加，可以縮短組裝所需時間。未來第 3 臂之設計若改以折疊式，則更可以大幅縮短組裝時間。 | 同意               |
| 3. 機械手臂所拍攝之範圍為何？請說明。  | 3. 攝影機所能拍攝到的範圍取決於鏡頭放大倍率、攝影機與檢測目標之距離，依攝影機規格及實測，不使用伸縮鏡頭而無放大倍率時，攝影機鏡頭與檢測目標距離 265 公分時拍攝範圍之寬度約為 128 公分。  | 同意               |
| 4. 目前較大橋梁常規劃設有自行車道，並以欄杆區隔慢車道，故人行道寬度勢必增加，未來應用機械手臂檢測時，檢測方式需再加以考量。 | 4. 本計畫所開發之橋檢車是以 3.5 噸小貨車為載臺，實施對橋寬 12 公尺以下之橋梁檢測。由理論計算及實測經驗所定之規格為                                     | 同意               |

|  |   |    |
|--|---|----|
|  | 作業時橋檢車距離橋外緣之最大距離為1.49公尺，因此若人行道寬度大於此範圍，則本計畫所開發之橋檢車不再適用，應改以大型橋檢車實施檢測。   |    |
| <b>(二) 陳松堂委員</b>   |   |    |
| 1. 期末報告對機械手臂之減重及依實測結果修正設計，努力值得肯定。  | 1. 敬悉。  | 同意 |
| 2. 機械手臂之機構平衡分析，除考慮平面之彎矩及剪力（如圖1）、揚角 $76^\circ$ 外，亦應考量立體（3D）（如圖2）之靜力及動力之最大合成應力（包括彎矩moment、扭力torsion、剪力shear）及揚角 $0^\circ$ （ $\text{Cos } 0^\circ = 1$ 最大值）。 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>圖 1</span> <span>圖 2</span> </div> | 2. 機械手臂第1節臂因彎矩及剪力所產生之平面應力是依「移動式起重機安全檢查構造標準」所列基礎計算公式所計算，而綜合彎矩、扭力、剪力的總合成應力之計算則是採用電腦輔助分析之有限元素法，藉以計算結構中每一截面上任一位置的立體等效合成應力，分析結果詳列於結案報告中。 | 同意 |
| 3. 第3次於澎湖跨海大橋檢測失敗後未再進行其他橋梁檢測，建議若契約允許能再找一座橋梁作實地驗證，俾使本計畫更臻完整。  | 3. 遵照辦理。實地檢測之時間經與各單位聯繫後確認後執行，並將檢測結果併入結案報告中。   | 同意 |
| 4. 本計畫內容及工作項目包含五大項，惟期末報告對部分項目之內容敘述似稍有不足，如「控制軟體之開發」、「96年度所開發之前端數位影像擷取與後端資料分析軟硬體整合測試，並實地審驗及改善輸出影像品質」等。   | 4. 計畫內容及工作項目所列而有不足處，進一步修正補充於結案報告內。  | 同意 |
| 5. 後續研究案之建議：<br>(1) CCD 可自動前後移動位置，俾利檢測範圍內  | 5. 敬悉。未來之研究納入考量，以增加檢測品質與效率。   | 同意 |

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| <p>之每一根大梁。</p> <p>(2) CCD 可正向檢視大梁側面，俾利檢測大梁之剪力裂縫。</p> <p>(3) CCD 攝影之資料轉入「橋梁資料庫系統」之系統建置及操作範例。</p>                                  |  |           |
| <p>6. 第 1 臂與第 3 臂間水平角度最大僅 25°，因而受人行道之限制。若可調整至 90°，則應較不受限制。</p>   | <p>6. 今年度計畫的橋梁檢測機械手臂設計的特色是將所有機械手臂之驅動及操作均由第 1 臂執行，以達減重之目的。若第 1 臂與第 3 臂間水平角度調整至 90°，則需另增動力輔助機構來驅動第 3 臂，然此舉將增加第 2 臂所承受之力矩，並不符合計畫設計構想。一般而言，有較寬敞人行道之橋梁均為大型橋梁，其檢測工作應以大型橋檢車執行較為適當。</p>                                  | <p>同意</p> |
| <p>7. 機械手臂應力之計算是以第 1 節臂在 76°最大仰角及最大載重時之條件進行分析，但第 1 節臂愈水平則載重量越低，而第 2、3 節臂重量固定，所以分析時以 76°計算較不適合。個人建議是否在機械手臂第 1、2、3 節處找出最大合力力量。</p> | <p>7. 機械手臂之承受應力在報告中是以第 1 臂在最大仰角及最大載重時進行分析計算，當改變舉升角度時所能負載之荷重可由力平衡公式計算而得，並不受限於 76°。依本計畫所使用之第 1 臂油壓吊桿之規格計算，其在最大仰角時能承載 500 公斤，而在水平延伸時，由力平衡公式計算仍可荷重 125 公斤，大於第 2、3 節臂之重量總合。機械手臂第 1、2、3 節處最大合力力量及承受應力，可由電腦輔助分析之有限元</p> | <p>同意</p> |

|  |   |    |
|--|---|----|
|  | 素法來計算結構中每一截面上任一位置的立體等效合成應力，分析結果詳列於結案報告中。  |    |
| 8. 組裝方式若改成折疊方式，需考量其重量是否能以 1 個人來操作。   | 8. 機械手臂第 3 臂經減重後僅有 12 公斤，其重量未超過 1 個人可負擔之能力。   | 同意 |
| 9. 拍攝裂縫時，裂縫長度、寬度能否在照片中顯示？  | 9. 裂縫長度和寬度需另撰寫程式來計算，同時，在拍攝時亦必需將已知長度之參考物一併攝入；如果沒有參考物，則需搭配雷射測距儀以量測鏡頭至檢測目標間之距離，再以此距離計算裂縫長度和寬度。 | 同意 |
| 10. 拍攝之影像能否整合至橋梁管理資料庫系統？如何移轉？請詳細說明。  | 10. 檢測作業時攝影機所錄製之影像依需要定格單張擷取並儲存成影像檔，存入橋梁檢測資料庫，而資料上傳至橋梁管理資料庫系統時，系統開放上傳權限並規劃欄位即可。              | 同意 |
| <b>(三) 鄧文廣委員</b>   |   |    |
| 1. 研究報告很充實，很具實用性，橋梁檢測較屬工學性而非科學性，它介於人力與橋檢車之間，可定義為篩選性工具，先初步篩選，若發現問題再調派大車檢測，因此非萬能工具，而是輔助工具。 | 1. 敬悉。  | 同意 |
| 2. 機械手臂在最大伸展狀態，安全性為何？應加以考量。  | 2. 機械手臂之最大伸展，是當第 1 臂伸長至 6.8 公尺及第 2 臂伸長至 4.5 公尺之時，該條件下之安全傾覆分析及計算，詳列於報告第 3.2 節中。              | 同意 |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 3. 報告第 3 章中，第 12 頁尺寸描述與第 23 頁呈現尺寸不太一樣，請修正。       | 3. 報告第 3.1 節之第 12 頁的尺寸為機械手臂第 1 臂的結構外型尺寸，而第 3.2 節之第 23 頁的尺寸呈現則為結構重心位置之標示，用以計算安全平衡，兩尺寸標示及呈現因目的不同而有異。           | 同意 |
| 4. 實測時有加配重塊，加配重後的安全係數為何？                         | 4. 加配重後的安全係數另分析計算，詳列於報告第 3.2 節中。   | 同意 |
| 5. 風速大時，不建議使用，除考量安全性外，其攝影品質可能因晃動而不理想。            | 5. 敬悉。檢測作業時的環境條件詳列於報告中第 3.8 節橋檢車規格及性能表中  | 同意 |
| 6. 報告第 53 頁強度計算公式請再做確認。                          | 6. 報告之強度計算公式是遵循內政部 69.6.28 台內勞字第 22754 號令之「移動式起重機安全檢查暫用構造標準」規範，並依此計算車身大梁強度。                                  | 同意 |
| 7. 報告中的機械手臂操作程序太文字化，不易解讀，且有些敘述較不明確，建議以簡化、簡單方式呈現。 | 7. 敬悉。結案報告中改進措詞及表達，並輔以照片說明和操作示範錄影光碟。   | 同意 |
| 8. 表 9「橋梁檢測車可停靠距橋邊之距離」，建議以數值範圍表示，避免用單一數值呈現。      | 8. 敬悉。結案報告中增列相關資訊。   | 同意 |
| 9. 動態檢測時，檢測車的時速為何？                               | 9. 一般狀況下攝影時，若以低於 1/30 秒的快門速度拍攝，容易產生影像晃動而拍出模糊的照片，而計畫中所選用之攝影機電子快門可達 1/60-1/120,000 秒，因此在檢測車前行時的動態檢測影像清晰。以平衡安全考 | 同意 |

|   |  |    |
|---|--|----|
|   | 量時，車行速度仍不宜過快，經翡翠水庫一號橋實地驗證，檢測車時速低於30公里以下可兼顧攝影品質及平衡安全。 |    |
| <b>七、主席結論：</b>                            |  |    |
| 1. 感謝各位委員蒞臨指導，並提供許多寶貴意見，也感謝大同大學團隊費心辦理此研究。 | 1. 敬悉。   | 同意 |
| 2. 各委員之意見請團隊予以回應，委員建議若為契約範圍所能及，請納入期末報告。   | 2. 遵照辦理。   | 同意 |
| 3. 請大同大學於97年12月20日前將期末報告定稿送交本所，本期末報告審查通過。 | 3. 敬悉。   | 同意 |
| <b>八、散會</b>                               |  |    |



## 附錄 3：期末簡報



# 橋梁檢測機械手臂研發進階計畫 期末報告

執行期間：97.02.20~97.11.19

計劃主持人：大同大學 工業設計學系 董基良

報告人：亞東技術學院 機械工程系 馮君平



## 簡報大綱

---

- 一、緒論
- 二、文獻回顧
- 三、橋梁檢測機械手臂設計
- 四、橋梁檢測機械手臂實測
- 五、結論與建議

## 緒論



### 計畫背景

- 依據「臺灣地區橋梁管理系統」至97年7月的統計資料，臺灣地區共有大小橋梁**24,102座**(不含鐵路橋梁)，橋梁**平均橋齡為18.02年**，而橋梁橋齡在40年以上之數量則達754座。
- 臺灣地區橋梁已進入老化期，**檢測及維修工作將隨橋齡日增**，而檢測結果為橋梁是否需進行維修之依據。



### 研究目的

- 目前既有之橋梁檢測車**價格高、數量少、體積大**，同時現行將檢測人員運送至橋梁下執行目測工作亦存在有**較高之安全風險**。
- 因此，如何以有限人力在兼顧**效率、經濟、安全**的狀況下進行橋梁檢測實為重要課題。



- 營建署在89年曾發展一裝載機械手臂之橋梁檢測車，並初步測試檢測功能，但存在**機構龐大**之問題。
- 運研所於去(96)年試行開發以**小型箱型車**為載臺的機械手臂橋梁檢測車。克服機械手臂機構之收納性，並在低照度及機械手臂操作時有良好的檢測品質。
- 今年度**延續前述計畫**之成果，進一步朝實用、方便及安全的角度開發橋梁檢測車。



## 研究範圍與對象

- 依「臺灣地區橋梁管理系統」之統計資料，以橋面淨寬來分類，**橋寬小於12公尺**之橋數計有17,359座，佔橋梁總數之**72.02%**，**橋寬小於15公尺**之橋數計有19,378座，佔橋梁總數之**80.4%**。

| 橋梁管理機關   | 橋寬小於12公尺之橋數 | 橋寬小於15公尺之橋數 | 橋寬小於20公尺之橋數 |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| 縣市政府     | 15,335      | 16,544      | 17,272      |
| 公路總局     | 1,460       | 2,049       | 2,958       |
| 高公局      | 564         | 785         | 1,697       |
| 合計       | 17,359      | 19,378      | 21,927      |
| 佔橋梁總數百分比 | 72.02%      | 80.40 %     | 90.98 %     |

- 本研究開發之橋梁檢測機械手臂將以**3.5公噸以下小型貨車**(駕駛人持小型車普通駕照)為**機械手臂載臺**，附加**紅外線攝影機**。
- 檢測範圍以橋梁**單邊檢測時可達6~7.5公尺為目標**。檢測時來回雙向各進行一次，可執行檢測橋面寬度12~15公尺的橋梁。

## 文獻回顧

### 國外橋梁檢測設備

- 承載檢測人員者為大型橋梁檢測設備，由多節臂桿組成[2-6]。

[2]Hydra Platforms Manufacturing

[3]Aspen Aerials

[4]Moog

[5]N. E. Bridge Contractors, Inc.

[6]Facelift, Inc.,





— 小型設備以攝影機執行橋梁檢測來取代人員直接目測 [7-10]。

[7]Serpentine Robot

[8]LCPC

[9]Aerial Platform System

[10]JLN Labs



## 國內使用之橋梁檢測車



## 國內設計之橋梁檢測車

- (89)年營建署



- (96)年運研所





# 橋梁檢測機械手臂設計



## 機械手臂設計

- 設計採3臂式。
- 第1臂選用國內力有機械之油壓驅動吊桿，全長可達6.8公尺，並可 $359^{\circ}$ 旋轉及 $76^{\circ}$ 上仰。在最大仰角及吊桿延伸至最長時可吊重500公斤。
- 第2臂以3節鐵管套接而成，總重33.3公斤。以捲揚機控制鋼索來收放，全長可達4.5公尺。
- 第3臂以鋁合金板成型組裝而成，全長共計6公尺，總重為11.83公斤。



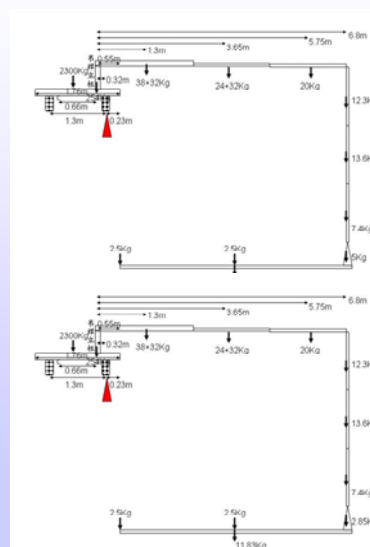
## 機械手臂測試



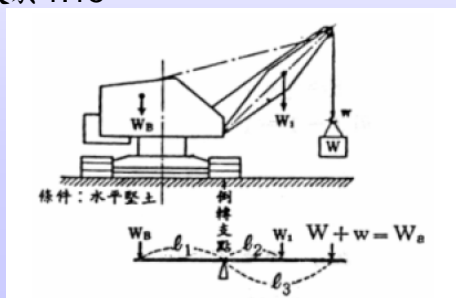
## 機構平衡分析

- 初步設計，安全係數1.76

- 減重設計，安全係數1.90



- 第3臂自重及攝影機重量合併以點質量型態集中於第2臂末端，安全係數 1.73。
- 行政院勞工委員會94年5月12日勞檢2字第0940024049號令發布之「移動式起重機安全檢查構造標準」對前方安定度之規範，安全係數應大於1.15。



### 油壓吊桿結構強度分析

- 依「移動式起重機安全檢查構造標準」第二章第三節第11條所列舉之荷重所產生之應力值加總計算。
- 油壓吊桿箱型伸臂強度計算同時考慮彎曲力矩及軸向壓縮力，再進而計算合成應力。
- 應力值不得超過「移動式起重機安全檢查構造標準」第二章第二節第5條規定之容許值。



### 伸臂荷重

- (1) 垂直靜荷重— 3節伸臂重量及附加油壓缸重量
- (2) 垂直動荷重— 吊升之負重
- (3) 水平動荷重— 伸臂自重加吊升荷重合計後之百分之五
- (4) 風荷重— 以吊桿作業時風速16公尺/秒(相當於7級風)，作業停止時風速55公尺/秒(相當於16級風)之狀況推導計算

### 彎曲應力

- (1) 垂直彎曲力矩(垂直靜荷重及垂直動荷重相對於計算斷面)
- (2) 水平彎曲力矩(水平動荷重及風荷重相對於計算斷面)



### 壓縮應力

垂直靜荷重及垂直動荷重對於伸臂均發生軸向壓縮力

### 材料容許應力

結構鋼 SS400 降伏強度215 MPa， $\sigma_a = 215/1.5 = 143.3$  MPa。

#### 伸臂第1節 彎曲應力

$129.96(\text{垂直彎曲應力}) + 13.31(\text{水平彎曲應力}) = 143.27$  MPa  $\approx$  容許抗拉應力( $\sigma_{ta} = \sigma_a$ ) 143.3 MPa

#### 伸臂第1節 壓縮應力

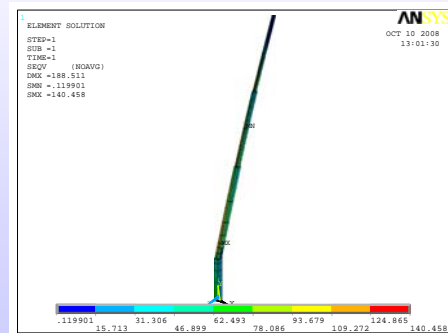
$3.337 \text{ MPa} < \text{容許抗壓應力}(\sigma_{ca} = \sigma_a/1.15) 124.6 \text{ MPa}$



## 油壓吊桿結構強度分析— 有限元素法

垂直荷重、水平荷重及風力  
一併考慮時，吊桿最大應力  
值140.45 MPa。

前述以基礎材料力學公式計  
算所得之最大應力值為  
143.27 Mpa，兩者相近。



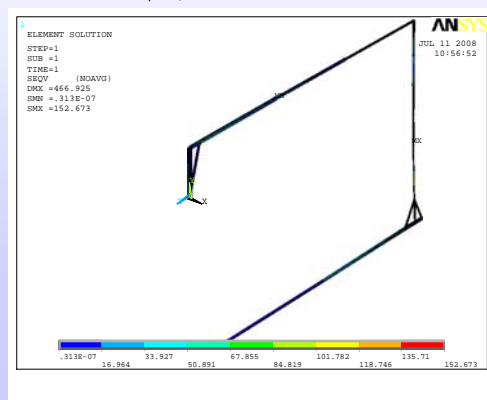
1



## 機械手臂整體結構強度分析— 有限元素法

### 初始設計之結構靜態分析

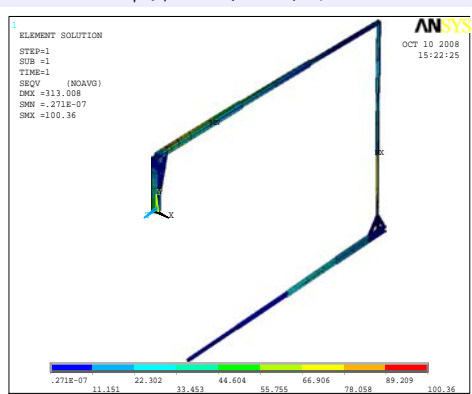
最大應力值152.67 MPa在第2臂之鐵管結構中，以鋼管  
STPG38之降伏強度215.6 MPa計算，安全係數1.4。





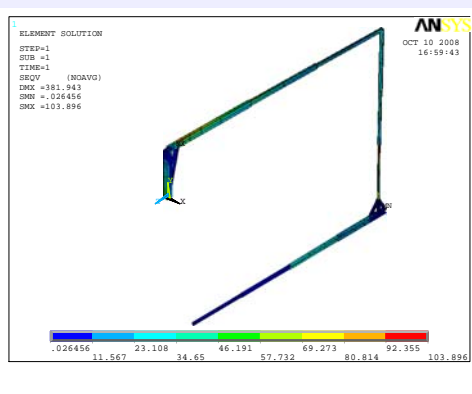
### 減重設計之結構靜態分析(自重及載重)

最大應力值100.36 MPa在第2臂之鐵管結構中，以鋼管STPG38之降伏強度215.6 MPa計算，安全係數2.15。



### 減重設計之結構靜態分析(自重及載重+風荷重)

最大應力值103.896 MPa在第2臂之鐵管結構中，以鋼管STPG38之降伏強度215.6 MPa計算，安全係數2.07。

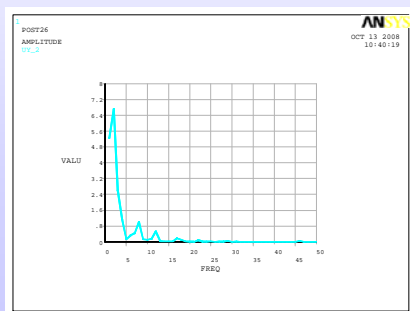






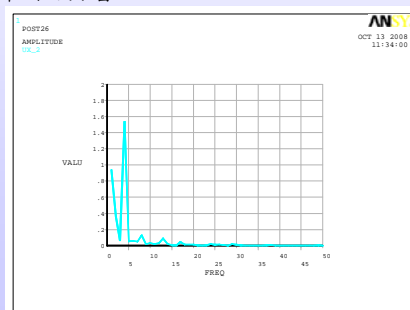
### 減重設計之結構動態分析(自重及載重)

機械手臂承受自重及載重的簡諧振動動態作用力，振動頻率從1Hz到50Hz。第3臂末端裝置攝影機位置的上下垂直方向位移量受動態作用力頻率2Hz時產生較大的共振現象，而在頻率15Hz以上時動態效應即不顯著。



### 減重設計之結構動態分析(風荷重)

機械手臂承受風荷重的簡諧振動動態作用力，振動頻率從1Hz到50Hz。第3臂末端裝置攝影機位置的左右水平方向位移量受動態作用力頻率4Hz時產生較大的共振現象，而在頻率15Hz以上時動態效應即不顯著。





## 附屬結構強度分析

### 銅柱結構強度

導引機械手臂第2臂各節鋼套管伸縮的銅柱結構主要承受剪力，剪力來自於不讓第2臂各節鋼套管間產生相對轉動—

- (1)第3臂自重及承載之攝影機重量因機械手臂幾何關係而對第2臂鋼套管產生力矩所造成
- (2)風力作用於機械手臂第3臂而對第2臂鋼套管產生旋轉力矩



- 第3臂外轉角度— 配合橋檢車作業時停靠點，機械手臂組裝時第3臂與平行橋梁方向夾角 $15^{\circ}$ ~ $25^{\circ}$
- 第2臂斜傾角— 為使操作過程中第3臂保持水平，第2臂有 $15^{\circ}$ ~ $25^{\circ}$ 之斜傾角
- 作業時會因第2臂斜傾及第3臂外轉角，致使第2臂鋼套管產生扭力，不同斜傾及外轉角度時圓柱形銅柱和矩形立方體銅柱的安全係數如下：

| 矩(圓)形銅柱<br>之安全係數 |              | 第3臂外轉角度      |              |              |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                  |              | $15^{\circ}$ | $20^{\circ}$ | $25^{\circ}$ |
| 第2臂<br>斜傾角       | $0^{\circ}$  | $\infty$     | $\infty$     | $\infty$     |
|                  | $15^{\circ}$ | 19.41        | 14.21        | 12.01(3.43)  |
|                  | $25^{\circ}$ | 11.19        | 8.70         | 7.30(2.1)    |

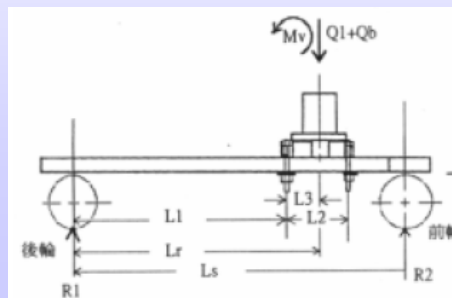


- 風力作用於機械手臂第3臂對第2臂銅套管產生一旋轉力矩，銅柱此時承受剪應力。
- 風速17.1 m/s (7級風)時
  - 圓形銅柱安全係數 2.94
  - 矩形銅柱安全係數 10.3
- 圓柱形銅柱之橫截面為 8mm直徑之圓形，而矩形立方體銅柱之橫截面為 11mm × 16mm之矩形。



### 聯結栓及車身大樑結構強度分析

- 依「移動式起重機安全檢查暫用構造標準(內政部 69.6.28 台內勞字第22754 號令)」，計算結合橋梁檢測機構與車身大樑的聯結栓、車身大樑結構之強度
  - 車身大樑結構應力 75.436 MPa
  - 聯結栓應力 14.65 MPa



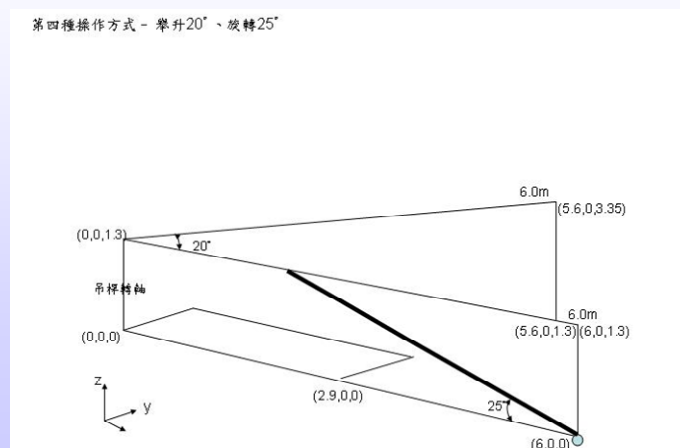


### 機械手臂操作程序

1. 第一臂伸長，第2、3臂接合。
  - (a) 第1臂水平伸長，第2、3臂對接位置在吊桿轉軸(立柱)正後方6 m處；
  - (b) 第3臂與橋身縱向維持25度；
  - (c) 第2臂完全收回；
  - (d) 快速接頭對準、扣住，以13號梅花板手上扭力。
2. 第1臂舉升。
  - (a) 舉升高度以上仰20度左右，此時第3臂高於橋護欄；
  - (b) 保持第3臂水平，維持CCD端高度。
3. 第1臂逆時鐘方向左迴轉。
  - (a) 維持第2臂之長度呈完全收回狀態(注意調放鋼索，避免收緊)；
  - (b) 保持第3臂水平，維持CCD端高度。
  - (c) 迴轉至第3臂與橋身縱向呈平行，跨出橋梁護欄。
4. 第2臂放長。
5. 第1臂逆時鐘方向左迴轉進橋梁底。



第四種操作方式 - 舉升20°、旋轉25°



## 橋檢車停靠處與橋邊之距離

橋梁檢測車可停靠距橋邊之距離，即檢測車與橋緣間最大容許空間。待檢測橋梁上有人行道，其寬度若大於最大容許空間，則機械手臂無法將第3臂及攝影機移出橋外執行檢測。

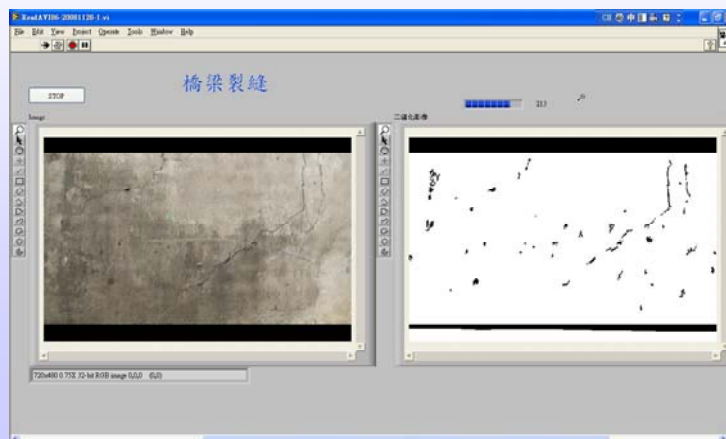
|         |     | 橋梁檢測車與橋外緣間最大容許空間<br>(橋護欄寬度以0.5m計) |        |
|---------|-----|-----------------------------------|--------|
|         |     | 使用油壓腳                             | 不使用油壓腳 |
| 第3臂組裝角度 | 15° | 尚不足0.10 m                         | 0.50 m |
|         | 20° | 0.40 m                            | 1.00 m |
|         | 25° | 0.89 m                            | 1.49 m |

## 攝影機



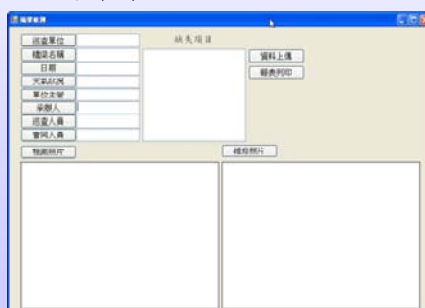
彩色22倍伸縮鏡頭紅外線攝影機(VDI-22X-PTL)

## 裂縫檢測影像輔助

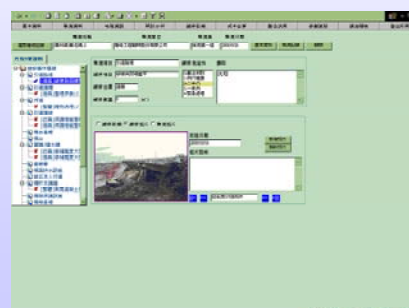


## 橋梁管理資料庫整合

檢測作業時攝影機所錄製之影像檔依需要定格單張擷取和儲存至橋梁檢測資料庫，並可上傳至運研所之橋梁管理資料庫系統。



橋梁檢測資料庫



運研所之橋梁管理資料庫系統



## 橋梁檢測機械手臂實測



### 翡翠水庫管制區內一號橋



1

## 定點檢測

民國97年7月20日 第1次實地檢測





第1次實地檢測測試之檢討改進：

1. 機械手臂第2臂與3臂接合改進設計。
2. 加裝小型攝影機，監控橋面下。
3. 測試6公尺長臂之操作。
4. 機械手臂操作步驟標準化。



## 民國97年7月26日 第2次實地檢測



## 動態檢測

民國97年7月26日 第2次實地檢測，CCD隨橋檢車前進同步進行拍攝工作。





## 澎湖跨海大橋實測

民國97年8月19日在外島澎湖跨海大橋進行橋檢車第3次實地檢測。





### 澎湖跨海大橋實地檢測之檢討改進：

1. 跨海大橋之人行道寬1.23公尺，橋護欄附加水銀燈之寬度0.47公尺，合計寬度略大於規格所定之最大容許空間，操控困難度增加。
2. 導引第2臂第2、3節伸縮之導槽銅柱斷裂，攝影機無法繼續深入橋面下。



### 橋檢車設計修正改進驗證

民國97年10月31日在樹林市塔寮坑溪堤岸邊進行修正改進之驗證：

1. 第2臂導槽銅柱之設計改進
2. 橋檢車與橋護欄距離
3. 第3臂吊繩/平衡塊





## 結論與建議



### 結論

- 1.實地於翡翠水庫一號橋進行2次檢測測試、澎湖跨海大橋進行1次檢測測試，及塔寮坑溪堤岸邊進行數次之修正驗證測試，證實機械手臂檢測作業之可行。
- 2.與營建署在89年發展之橋檢車相較，已將6噸中型貨車改為3.5噸小型貨車，總重922公斤機械手臂減重至448公斤，檢測橋面寬度由4公尺增至6公尺，大幅提升檢測效率。
- 3.三臂式機械手臂，附載2個紅外線CCD攝影機，同步拍攝及傳輸影像。檢測所得之影像可以記錄存檔，並上傳檢測資料聯結至橋梁管理資料庫系統。



### 建議

未來可改善之處建議如下：

- 1.克服人行道之限制—改裝油壓支撐腳加，使之能置放於人行道上，增加機械手臂操控靈活性。
- 2.縮短機械手臂組裝時間—第3臂採折疊式，執行檢測作業時將之展開，再扣上扣環。
- 3.第2臂減重及加長—尋求更適當厚度之各節套管以減重，或改以4節套管，以與第1、3臂固定組合而不必拆裝。
- 4.攝影機輕量化—隨電子相關技術之發展，可以選用更輕巧、又具相同功能之攝影機。





---

敬請指教