橋梁水下檢測作業之國外回顧與國內展望

關鍵詞(Key Words)：橋梁水下檢測(Bridge Underwater Inspection)、檢測類別(Type of Inspection)、檢測頻率(Frequency of Inspection)、橋梁水下檢測潛水員(Underwater Bridge Inspection Diver)、潛水檢測(Diving Inspection)、涉水檢測(Wading Inspection)、水下構件(Underwater Element)、儀器檢測(Instrumentation Inspection)、水下無人載具(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)

新中光物理探測公司／顧問／王鶴翔 (Wang, Helsin) ❶

國立中央大學／土木工程學系／教授／王仲宇 (Wang, Chung-Yue) ❷

財團法人中華顧問工程司／設施技術中心／主任／蔡欣局 (Tsai, Hsin-Chu) ❸

財團法人中華顧問工程司／設施技術中心／工程師／周姿良 (Chou, Tzu-Liang) ❹

摘　要

地震、洪水、沖刷、超載、腐蝕劣化作用所造成橋梁水下構件的損傷，其檢測與診斷素為國內外橋梁維護管理重點關注議題。本文彙整十三個國家的橋梁水下檢測制度，綜述各國橋梁水下檢測作業的檢測週期、檢測定位、檢測目的、檢測人員，以及相關配合儀器/設備等，其中特別詳述美國橋梁水下檢測之檢測人員資格與訓練認證、檢測項目、檢測對象、檢測週期、檢測等級、檢測類別等，說明傳統潛水檢測與儀器檢測共存的必要性，概述水下儀器檢測的三大類型，以及現有常用的定點式沖刷量測技術介紹，並回述臺灣現有橋梁水下檢測作業之相關規範與執行現況，針對國內橋梁水下檢測特性與需求，綜合梳理國內橋梁水下檢測未來努力發展的方向。




Foreign Review and Future Development in Taiwan for Bridge Underwater Inspection

Abstract

Earthquake, flood, scour, overloading, and corrosion deterioration cause severe damages on bridge underwater components. Its inspection and diagnosis have always been key concerns for bridge maintenance and management worldwide. This article summarizes the bridge underwater inspection systems in thirteen countries. The relevant description covers the inspection period, inspection position, inspection purpose, inspection personnel, and supporting instruments/equipment associated with bridge underwater inspection operations in various countries. Especially, more details of bridge underwater inspection involve the personnel qualification, training certification, inspection items, inspection objects, inspection period, inspection level, and inspection type developed in the United States. Moreover, this paper indicates the necessity of coexistence between traditional diving inspection and instrumentation inspection, an overview of three types of in-service underwater instruments, and a brief introduction on the commonly-used fixed-position scour measurement technology. This article also reviews the relevant specifications and implementation conditions on bridge underwater inspection operations in Taiwan. In response to the characteristics and needs of bridge underwater inspection, comprehensive opinions point out the future development direction and efforts on bridge underwater inspection in Taiwan.

壹、前言

交通部委託國立中央大學橋梁工程研究中心發展臺灣地區橋梁管理系統(Taiwan Bridge Management System, TBMS)，該系統於2000年底建置上線，提供作為全國各單位統一使用之橋梁管理系統，同時進行全國性橋梁普查，調查相關橋梁基本資料，並進行全面性之橋梁目視檢測評估，該次所有調查資料均輸入臺灣地區橋梁管理系統之中，2015年起啟動第二代「臺灣地區橋梁管理資訊系統」(TBMS2)。後續依交通部頒訂公路養護規範之規定[1]，原則上，橋梁管理機關每兩年進行一次橋梁目視檢測(Bridge Visual Inspection)，各橋管機關可視實際狀況需要延至四年，並將目視檢測結果登載於管理系統內，目前已有2萬8千餘座橋梁登錄於該系統中[2]。

橋梁水下結構劣化(Deterioration)狀態，以及周遭環境檢測(Inspection)與健康監測(Health Monitoring)，素為國內外橋梁防災工作所須突破之重點，亦以氣候變遷(Climate Change)肇致破壞力極大的天然災害(Natural Disaster)，外部荷載作用(External Loading)常超越當初設計規範值，均將加速橋梁結構劣化的速率，以致橋梁需要更經常性的檢測與維修(Maintenance)，方才確保橋梁的安全性(Safety)、服務性(Serviceability)，以及使用性能(Performance)。

美國聯邦公路總署(Federal Highway Administration, FHWA)編訂的橋梁檢測手冊[3, 4]，以及國內交通部頒訂的橋梁檢測相關規範中[5-7]，有關橋梁下部結構(Substructure)、水道(Waterway)，以及周遭環境等要項，包括河道變遷(Channel Migration)、引道(Approach)路堤與基礎(Foundation)處的沖刷(Scour)、下部結構保護設施(Protection Works)諸類檢測，無論是定性描述(Qualitative Description)或定量量測(Quantitative Measurement)，均涉及橋梁水下檢測(Bridge Underwater Inspection)的範疇，對保障既有跨水橋梁(Overwater Bridge)的安全性，橋梁水下檢測作業有其不可或缺的地位。

國外橋梁破壞(Bridge Failure)相關案例研究顯示：(1)尤以自然災害的洪水(Flood)與沖刷相關兩項，即佔橋梁破壞因素的比重將近半數(47%)[8, 9]；(2)自然災害衍生的土石流(Debris Flow)或漂流木(Drifting Woods)對橋梁下部結構的磨蝕(Abrasion)與衝擊(Impact)，以及船隻或車輛因人為失誤對橋梁下部結構的事故撞擊(Accident Collision)，均會嚴重折損橋梁結構安全性[9]，成為橋梁破壞因素的次因；(3)對於跨水、感潮河段(Tidal Reach River)或跨海(Oversea)橋梁，其下部結構的混凝土(Concrete)破損(Fracture)或裂縫(Crack)，均極易誘發既有橋墩(Pier)內部的鋼筋銹蝕(Reinforcement Corrosion)，亦成為橋梁破壞的其它因素之一[9]。

國內重要橋梁因沖刷倒塌災害案例，例如：2000年碧利斯颱風造成高屏大橋斷橋事件，2001年桃芝颱風引發的臺中東門橋坍塌事件，2006年豪雨造成蘭勢大橋橋墩陷落，2008年辛樂克颱風洪水沖塌后豐大橋，2009年莫拉克颱洪沖斷雙園大橋等，均造成人員傷亡與財產損失，均顯示橋梁水下檢測確有其迫切性與必要性。

貳、國外水下檢測概述

各國橋梁檢測在既有運作體制、執行人力(Manpower)、經費配置(Budget Allocation)、既有技術等限制下，發展其橋梁檢測制度(Bridge Inspection System)，以維護橋梁的安全性、服務性，以及使用性能，雖各國橋梁檢測制度有其個別的考量而不盡相同，但以管窺豹仍有益於我國相關橋梁維護單位或橋梁監理，不斷地改進現有橋梁檢測制度，並完善實際橋梁檢測運

作，以確保橋梁檢測的質量控制(Quality Control, QC)/質量查證(Quality Assurance, QA)的高度準確性與一致性。

本研究檢視美國、挪威、丹麥、瑞典、芬蘭、德國、法國、英國、澳洲、紐西蘭、日本、加拿大、中國大陸等十三國的橋梁檢測制度[3, 4, 10-25]，了解各國對於橋梁水下檢測的定位；綜合前開十三國的橋梁檢測制度，各國橋梁水下檢測的檢測週期(Inspection Period)、執行方式(Operation Approach)與說明彙整於表1，其中可知多數設定檢測週期的國家，大致每5或6年進行一次獨立的或附隨的橋梁水下檢測，而澳洲與加拿大分別可達8年與10年之久，概與其國家所處環境或位居乾燥少雨，或地處水淺少雨有關，故而採長週期檢測；其他部分國家則依構件評分狀況(Structural Rating)、特殊狀況(例如：洪水、沖刷、撞擊等重大意外事件)等需求，由法定(Legal)/契約(Contract)檢測負責人決定執行橋梁水下檢測的檢測週期或時機。橋梁水下檢測所採用之執行方式：除英國將潛水檢測(Diving Inspection)與涉水檢測(Wading Inspection)均納入橋梁水下檢測之外，其餘國家僅將潛水檢測劃定為橋梁水下檢測範疇，涉水檢測則歸屬常規目視檢測方式之範疇。其餘說明詳見本文第叁節國外橋梁水下檢測作業的說明。

國外橋梁水下檢測的定位歸屬檢測類別摘述如表2所示[3, 4, 10-25]，大致可劃屬四種檢測類別(Type of Inspection)：美國、芬蘭、法國、加拿大等國將橋梁水下檢測定位為獨立的檢測類別，與水面以上的常規橋梁檢測具有同等橋檢位階；挪威、瑞典、德國、澳洲等國則將水下檢測列為主要檢測(Major Inspection)選項之一；丹麥、英國、中國大陸等國將水下檢測列為特別檢測(Special Inspection)選項之一；澳洲、紐西蘭、日本等國將水下檢測列為詳細檢測(Detailed Inspection)選項之一。

水下檢測在各國橋梁檢測制度的定位不同，故對水下檢測的執行強度(Operation Intensity)、人力需求、訓練要求(Training Requirement)、經費配置、裝備發展(Equipment Development)、檢測技術(Inspection Technique)等面向均有差異，不可全盤接納，需妥為參考引用。

表1 國外橋梁水下檢測週期一覽表(綜合[3, 4, 10-25])

國家	檢測週期	執行方式	說 明
美國	60個月	潛水	獨立檢測，可報請聯邦公路總署批准，最高可延長至72個月
挪威	未設定	潛水	主要檢測的獨立檢測
丹麥	不設定	潛水	區域橋梁檢測員選擇橋梁和檢測週期
瑞典	6年	潛水	附隨主要檢測進行，授權檢測隊決定河道剖面檢測與否
芬蘭	5年	潛水	獨立檢測，分區橋梁工程師排程
德國	6年	潛水	附隨主要檢測進行
法國	6年	潛水	獨立檢測，另視需要進行水下調查
英國	不設定	潛水/涉水	特別檢測選項之一，承包商結構經理設定不同的檢測週期
澳洲	視構件狀況設不同檢測頻率/不設定	潛水	各州自行制定檢測規定，昆士蘭州屬橋梁狀況檢測選項之一，依構件評等狀況給定1或8年不等的檢測週期，或列為詳細結構工程檢測選項之一；維多利亞州屬詳細工程調查選項之一
紐西蘭	6年	潛水	附隨詳細檢測進行，特殊狀況按橋梁檢測工程師指示進行檢測
日本	5年	潛水	附隨定期檢測層級下的詳細檢測進行
加拿大	60~120個月	潛水	各省自行制定檢測規定，近似獨立檢測
中國大陸	3~5年	潛水	特別檢測選項之一

表2 國外橋梁水下檢測定位歸屬檢測類別一覽表(綜合[3, 4, 10-25])

歸屬檢測類別	國 家
獨立的水下檢測	美國、芬蘭、法國、加拿大§
主要檢測	挪威、瑞典、德國、澳洲*
特別檢測	丹麥†、英國、中國大陸
詳細檢測	澳洲*、紐西蘭、日本₸

備註：

§加拿大聯邦由各省運輸單位制定相關橋梁檢測規定，亞伯達省不將水下檢測納為常規檢測；安大略省雖將水下檢測列於專業檢測(Specialized Inspection)選項之一，但又允許獨立看待；魁北克省將水下檢測列為獨立的檢測類別。

* 澳洲聯邦由各州運輸單位制定相關橋梁檢測規定，昆士蘭州將水下檢測列為橋梁狀況檢測(Bridge Condition Inspection)，以及詳細結構工程檢測(Detailed Structural Engineering Inspection)選項之一；維多利亞州將水下檢測列為詳細工程調查(Detailed Engineering Investigation)選項之一。

† 丹麥對水下檢測並無特別規定，由區域橋梁檢測員(Region Bridge Inspector)決定施作時機。

₸ 日本將水下檢測列為定期檢測(Routine Inspection)層級下的詳細檢測選項之一。

參、國外橋梁水下檢測作業

因美國橋梁水下檢測制度發展已逾40年，橋梁檢測制度相對完善，亦以相關研究報告眾多，以及各州編訂更詳細的橋梁檢測手冊，擬單獨置於第肆節美國橋梁水下檢測作業中說明，本節僅就挪威、丹麥、瑞典、芬蘭、德國、法國、英國、澳洲、紐西蘭、日本、加拿大、中國大陸等12國家的橋梁水下檢測作業，就其檢測目的、檢測週期、執行檢測人員，以及相關配合儀器/設備等方面加以彙整說明如下各次節。

一、挪威

挪威公共道路總署(Norwegian Public Roads Administration; Statens veg-vesen)設有中央辦公室，5個地區(Region)，以及30個分區(District)，採合約方式進行橋梁的興建(Construction)與維護工作；每個地區設一名專責工程師，負責該地區橋梁的管理(Management)、檢測、維護、整修(Rehabilitation)、補強(Strengthening)，以及施工等工作[12, 13]。

挪威公共道路總署採用基於風險(Risk-Based)的檢測思維，將橋梁檢測分為三階層及七種檢測類別架構，橋梁水下檢測劃屬主要檢測下的獨立檢測作業，橋梁水下檢測係以潛水檢測方式進行，主要檢測目的為掌握水下結構構件狀況，以及河床(Streambed)狀況，用以決定維護作業的需求與費用[12-14]。

二、丹麥

丹麥道路總局(Danish Roads Directorate, DRD)設有獨立的橋梁處(Bridge Department)，該單位由一名經理(Manager)和六名分區橋梁檢測員(District Bridge Inspector, BI)組成。橋梁管理系統(Danbro)由一名橋梁資料專家(Bridge Data Specialist)與三名工作人員(Staff)維護，並由顧問協助相關工作[13]。

丹麥道路總局對橋梁水下檢測無特別規定，亦無固定的檢測頻率，由區域橋梁檢測員(Region Bridge Inspector)擇定橋梁與檢測週期，僱用相關經驗工作人員擔任潛水檢測，水下檢測員需具有良好的身體狀態(Physical Condition)、視力(Eyesight)，以及辨色能力(Color Perception)，採底部穿越(Underpassing)形式進行橋梁水下狀況評等[12-14]。

三、瑞典

瑞典道路總署(Swedish Road Administration, SRA; Vagverket)聘請兩名檢測專案經理

(Inspection Project Manager)，共同制定橋梁檢測策略、維護檢測手冊，以及指導檢測品質計劃。瑞典道路總署設有20名檢測隊隊長(Inspection Team Leader)，可自己執行或聘請橋梁檢測員(Bridge Inspector)進行橋梁檢測，以及執行品質控制[13]。

瑞典道路總署的橋梁水下檢測係屬主要檢測的一部分，通常每6年進行一次[12-14]；在日光或同等光照條件下，僱用合格的潛水員，在一隻手臂距離(Arm-Length)內，以視覺和觸覺方式檢查(Visual and Touch Inspection)水下結構構件，探測基礎周遭的沖刷坑(Scour Hole)，必要時採攝影機(Video)錄影[12, 13]。另外，河道剖面(Channel Profile)檢測則授權檢測隊(Inspection Team)決定執行與否[13]。

瑞典道路總署對水下檢測員的學歷、法規和材料知識等均有基本要求，但無正式的認證，水下檢測員亦需符合國家職業安全與健康委員會的潛水指引，潛水設備須經檢查和批准，並在檢測期間須遵循適當的潛水員安全措施[13]。

四、芬蘭

芬蘭道路總署(Finish Road Administration, Finra)負責監督承包商的設計(Design)、施工、維護，以及大部分檢測等工作，制定橋梁的國家標準，提供區域和地方道路機構的專家指導，並解決必須在國家層面協調的所有問題[13]。

芬蘭道路總署規定水下檢測係屬獨立檢測作業，一般每5年進行一次[12-14]，分區橋梁工程師(District Bridge Engineer)安排檢測時程表，由經特別受訓的具認證橋梁檢測員執行水下檢測，檢測目的主要針對流速(Flow Velocity)和冰損風險高的大河上橋梁，進行潛水的目視及觸診檢測，以俾了解鋼構(Steel)銹蝕(Corrosion)、混凝土磨蝕，或木材(Timber)腐爛(Rot)造成的構件損失，或因船隻或碰撞造成的構件損壞，基礎周圍的河床剖面，基礎損傷(Damage)的位置與程度，以及整個河床剖面，並將檢測發現登載於橋梁登錄清單中[12]。

五、德國

德國聯邦交通、建築和都市事務部(Federal Ministry of Transport, Building, Urban Affair; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, BMVBS)轄下的道路建設和交通辦公室(Office of Road Construction and Traffic)僅管理聯邦等級公路，並發布標準DIN 1076：與道路相關的工程結構—檢測與測試和統一評估、記錄和分析指令(Engineering Structures in Connection with Roads— Inspection and Test and Directive for Uniform Determination Assessment, Recording, and Analysis of the Results of the Inspection of the Structures)，提供有關橋梁檢測與試驗文件的詳細指引；各州負責管理各州轄下的橋梁檢測，控制橋梁管理系統中的資料，並制定維護發展計畫[12, 13]。

其道路建設和交通辦公室規定橋梁水下檢測係屬主要檢測的一部分，通常每6年進行一次[12-14]；若橋梁已探知損傷，則可於3年為週期的次要檢測(Minor Inspection)中，安排橋梁進行水下檢測。水下檢測員可能是具備潛水員資格的土木工程師，但更為常見的是非工程師潛水員，在現場土木工程師的指導下，由一名潛水員攜帶攝影機，以視覺和觸覺方式檢查水下結構構件[13]。

六、法國

法國國家道路總局(French National Road Directorate)負責發展及營運橋梁管理系統，大區(Région)設備部機構(Direction Départementale

de l' Equipement, DDE)負責維修、特別研究與調查，地方(Local)機構負責定期檢測與維護。另設有數個技術機構，其中由17個區域公共道路與橋梁實驗室(Public Bridges and Road Laboratories; Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, LRPC)共同負責分配橋檢管理，執行橋梁的詳細檢測、試驗(Testing)、儀器與診斷(Diagnosis)，橋梁與道路中央實驗室(Central Laboratory for Bridges and Roads; Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC)進行橋梁研究，並提供橋梁專家技術建議[13]。

法國國家道路總局規定水下檢測係屬獨立檢測作業，一般每6年進行一次，檢測目的主要針對水下構件，在一隻手臂距離內，進行視覺和觸診檢測，探測基礎周遭的沖刷坑[12-14]。水下檢測的潛水員受僱於國家政府，並分配至各區域公共道路與橋梁實驗室(LRPC)內執行檢測。另根據需要，亦有水下調查(Underwater Investigation)可進行完整的測量、材料取樣(Sampling)或相關試驗[13]。

七、英國

英國運輸部(Department of Transport)於2021年進行第3次改革轄下的公路局(Highways Agency)，由公務部門轉型為國營機構國家公路(National Highways)。英格蘭地區的公路橋梁主要分為20區，由私人公司負責管理營運，承包商僱用檢測隊隊長(Inspection Team Leader)、橋梁檢測員(Bridge Inspector)、潛水員(Diver)，目前約有30名檢測隊隊長、120名橋梁檢測員，以及10名水下檢測員；英格蘭以外的地區，則由蘇格蘭、威爾斯和北愛爾蘭政府負責道路與橋梁的建設和維護工作[13, 15]。

英國國營機構國家公路原先規定每6年進行一次橋墩基礎的水下檢測，後將水下檢測改列於特別檢測選項之一[15]，由各區承包商(Contractor)結構經理(Structure Manager)設定不同的檢測週期[13]，檢測目的主要針對提供水下結構狀況、河床剖面，以及沖刷狀況，並允許使用水下無人載具(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)或遙控潛艇(Remotely Operated Vehicle, ROV)進行攝影[15]。

八、澳洲

澳洲聯邦並無統一橋梁檢測事權的管理機構，係由各州運輸單位制定橋梁檢測相關規定，各州設有相似的橋梁資產管理系統(Bridge Asset Management System, BAMS)，系統內包括檢測系統(Inspection System)、橋梁資料系統(Bridge Information System, BIS)、維護系統(Maintenance System)、結構承載力(Structure Capacities)、財務管理系統(Financial Management System)、建議註記資料庫(Advice Notes Database)等子系統[16, 17]。

澳洲昆士蘭州(Queensland)政府將水下檢測列為橋梁狀況檢測(Bridge Condition Inspection)選項之一，檢測目的主要針對檢視結構狀況、材料、位置與構件評等，核對登載於橋梁資料系統的資料是否正確，並依水下結構構件評等狀況，給定1或8年不等的檢測週期，或將水下檢測列為詳細結構工程檢測(Detailed Structural Engineering Inspection)選項之一，整合詳細檢測、構件試驗、數值模擬(Numerical Simulation)，以及結構健康監測(Structural Healthy Monitoring)等，提報劣化樣態與預期劣化發展[16]。

澳洲維多利亞州(Victoria)政府將水下檢測列為詳細工程調查(Detailed Engineering Investigation)選項之一，對結構完整性或載重出現潛在影響的事故發生後，或於定期維護檢測(Routine Maintenance Inspection)與結構狀況檢測(Structure Condition Inspection)時，發現

具有潛在的承載力與穩定性危害時，綜合現地調查與理論分析，提供詳細狀況評等、載重評估、服務性能等訊息，另在複雜檢測(Complex Inspection)時，可使用遙控潛艇進行調查，節省成本與降低風險[17]。

九、紐西蘭

紐西蘭運輸局(New Zealand Transport Agency, NZ Transport Agency)針對國家道路系統，頒布橋梁檢測策略(Bridge Inspection Policy)，並設有橋梁描述登錄庫(Bridge Descriptive Inventory)，橋梁檢測工程師須呈報檢測、維護，以及調查報告給運輸專案經理(Transit Project Manager)與國家公路維護管理顧問，若狀況緊急，須立即建議運輸專案經理，若橋梁狀況產生變化，每季報告運輸計畫經理[18]。

紐西蘭運輸局將水下檢測列為詳細檢測選項之一，一般詳細檢測不超過6年進行一次，若橋梁基礎有磨蝕或撞擊危害，或量測出明顯沖刷狀況，則需進行水下檢測，按橋梁檢測工程師(Bridge Inspection Engineer)指示，由橋梁檢測員(Bridge Inspector)會同專業人員(Specialist Staff)進行檢測[18]。

十、日本

原先委由日本道路公團(Japan Highway Public Corporation, JH)制定橋梁檢測規定與手冊，2005年民營化後，改由三間日本高速道路株式會社(Nippon Expressway Company Limited, NEXCO)合組的日本(株)高速道路總合技術研究所(Nippon Expressway Research Institute Company Limited, NEXCO總研)負責發布橋梁檢測規定與手冊；日本國土交通省(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, MLIT)提供規範橋梁定期檢測要領[19-21]與相關參考資料[22]，但內容僅概括性規範橋梁定期檢測的範圍、頻率、劣化樣態、評分原則、健全性診斷，以及結果紀錄等，並非涵蓋所有橋梁檢測類別與對應相關要求。

目前日本各橋管單位，包括三間日本高速道路株式會社、區域高速公路經營者、都府道縣地方政府等，多依日本(株)高速道路總合技術研究所(NEXCO總研)編訂的「保全点検要領—構造物編」[23]，以及國土交通省頒定的定期檢測要領與相關參考資料[19-22]，自行編訂自用詳細的橋梁檢測手冊。

橋梁水下檢測列為定期檢測層級下的詳細檢測選項之一，一般定期檢測時間間隔以不超過5年為原則[19-21]，選擇旱季(Dry Season)執行橋梁水下部分檢測，可近距離直接掌握構件與河床狀況，主要由橋梁外觀結構可見明顯之下沉(Settlement)、位移(Movement)或傾斜(Tilting)處，採用水面探棒量測(Probe Measurement)，潛水員水下的目視檢測、量測、觸診、水下相機(Underwater Camera)，各種船載水下聲納(SOund Navigation And Ranging, Sonar)、光達(Light Detection and Ranging, LiDAR)等檢測方式[20, 22, 24]，以掌握水下結構構件狀況，包括銹蝕、挫曲(Buckling)，以及開裂(Cracking)等、河床剖面，以及基礎與保護工之沖刷狀況[19-24]；潛水員最好能清除橋梁構件的飛濺區(Splash Zone)與淹沒區(Submerged Zone)上之附著物，以確認構件狀況[20]。

十一、加拿大

加拿大聯邦運輸部(Canada Transport)、基礎設施部(Infrastructure Canada)，以及加拿大運輸局(Canadian Transport Agency)分別負責橋梁的管理、興建，以及經濟事務，橋梁檢測工作則由各省運輸單位制定相關規定，亞伯達省(Alberta)、安大略省(Ontario)、魁北克省

(Quebec)等省均頒定各自橋梁檢測與維護手冊，各省橋管部門設有一名檢測計畫經理(Inspection Program Manager)一職，以及若干名區域檢測經理(Regional Inspection Manager)職，均須有工程學位、技師(Professional Engineer, PE)執照、通過橋梁檢測訓練，以及5或10年不等的橋梁檢測經驗，負責行政、檢測策略、訓練與認證，以及品質管制與品質查證等業務[13]。

亞伯達省約15%的橋梁需以涉水檢測方式檢查特定構件，水下檢測並未列入常規檢測類別，僅要求水下檢測員為經驗豐富的橋梁檢測員，或在橋梁檢測員的直接監督下執行工作[13]；安大略省約10%的橋梁需進行涉水檢測，僅有極少數橋梁需進行水下檢測，水下檢測頻率約60~120個月不等一次[13]；魁北克省僅對10%的水域橋梁進行涉水檢測與水下檢測，水下檢測頻率為120個月一次，並規定須僱用兩名官方人員，作為水下檢測的領隊者[13]；再者，安大略省和魁北克省均要求水下檢測隊隊長，須有工程學位、專業技師(Professional Engineer, PE)執照，並通過潛水訓練[13]。

十二、中國大陸

中國大陸交通運輸部針對中國大陸公路橋梁箱涵系統，統一頒布「公路橋涵養護規範」[25]，而橋梁檢測(原稱檢查)、監測與評定屬於橋涵養護的前導項目之一，根據檢測評分結果決定橋梁養護與維修的項目，提及各類災害防治，並橋梁基本資料、檢測資料、維護資料等均應納入橋梁資料管理庫內。

中國大陸交通運輸部規定，養護檢查等級為I、II級之較重要橋梁，其初始檢測需進行水下基礎、河床狀況之詳細檢測，一般藉由相關輔助手段，例如水下攝影機、水下銹蝕電位(Corrosion Potential)儀等進行檢測，確認構件損傷狀況；流速(Current)和能見度(Visibility)符合要求時，亦採人工潛水檢測[25]。

橋梁水下檢測列述特殊檢測選項之一，一般根據水文(Hydrology)、地質環境(Geological Environment)、基礎型式(Foundation Type)，以及橋梁現況等因素，決定具體的檢測專案、頻率，以及內容。水下檢測的頻率通常為3~5年1次，倘若橋梁所處環境存在加速基礎狀況惡化時，例如：河床失穩、沖刷加劇、基礎有效埋置深度(Effective Embedment Depth)變淺、水質腐蝕性較強，以及所處河段有採砂等狀況，則需要提高檢測頻率[25]。

肆、美國橋梁水下檢測作業

一、概述

美國聯邦公路總署(FHWA)頒布國家橋梁檢測標準(National Bridge Inspection Standards, NBIS)[10]，制定結構檢測、檢測頻率、人員資格，以及檢測程序的規定，執行聯邦橋梁檢測計畫，規範或審查各州的橋梁檢測計畫。在聯邦法規範圍內行事的各州運輸廳(Department of Transportation, DOT)，則制定額外的橋梁檢測要求，並提供更詳細的橋梁檢測手冊與規劃[13]。

原則上，各州運輸廳遵循國家橋梁檢測標準(NBIS)水下檢測相關規定，然各州在實際執行面上，亦有各州額外附加的規定與要求[26]，例如：上述的國家橋梁檢測標準(NBIS)明確規定橋梁檢測計畫的四個工作人員職位，其中包括橋梁水下檢測潛水員(Underwater Bridge Inspection Diver)[10]，多數州運輸廳遵循該規定設有水下檢測隊隊長(Underwater Team Leader)與檢測員的職稱；有的州運輸廳則委由顧問公司處理水下檢測事務，若干州運輸廳設有合格的水下檢測隊隊長，通常於檢測隊隊長(Inspection Team Leader)資格上，增加潛水培訓與認證的

要求，或委由顧問公司完成水下檢測工作[13, 26]，有的州運輸廳則要求檢測隊隊長，需實際完成某個最少比例的水下檢測，甚至某些州運輸廳要求檢測員需通過適任考試(Competency Examination)[26]；水下檢測潛水員的健康狀況(Fitness)、視力(Vision)，以及辨色能力(Color Perception)，各州運輸廳均有不同程度的要求，但水下檢測潛水員須完成年度體檢，並維持潛水認證[13]。各州運輸廳需由獲得認證的潛水員，擔任檢測顧問的工作人員，但州運輸廳不參與潛水員認證工作[13]。

不論各州的州內法規如何，均須按國家橋梁檢測標準(NBIS)的聯邦要求，即水下檢測潛水員須參與橋梁檢測或水下橋梁檢測課程，並課後測驗成績達70分以上[10, 13, 26]，訓練課程可為下列之一：(1)聯邦公路總署轄下之國家公路中心(National Highway Institute, NHI)開設之訓練課程，種類為綜合性橋梁檢測課程、橋梁檢測在職訓練、橋梁水下檢測訓練等其中之一類的課程；(2)聯邦公路總署核定州運輸廳、聯邦機構開設之訓練課程，課程內容須與國家公路中心開課課程一致；(3)聯邦公路總署核定其他機構開設之訓練課程，課程內容須與國家公路中心開課課程一致。

美國聯邦公路總署編訂的橋梁檢測員參考手冊(Bridge Inspector’s Reference Manual, BIRM)[3]，提供一般橋梁檢測作業執行之依據，與橋梁水下檢測相關分述於兩部分：(1)有關橋梁下部結構本身部分—詳列混凝土、石砌(Masonry)、鋼構、木料材質各類型的缺陷(Defect)，目視判斷、實物觸摸與量測，以及進階檢測(Advanced Inspection Method)(即儀器檢測Instrumentation Inspection)的種類、時機與目的；(2)有關橋梁跨越水道部分—收集並了解水道的物理、地貌(Geomorphic)、變動特性，橋梁基礎的大小(Size)、形狀(Shape)與排列(Orientation)，水利設施(Hydraulic Countermeasure)狀況等，條列橋梁基礎可能形成之缺陷(Deficiency)類型，當涉水檢測不足以應付需求(如圖1所示)，方才進行所謂的潛水檢測

圖1 橋梁涉水作業[3]

(Diving Inspection)(如圖2所示)，並詳細羅列橋梁水下檢測裝備。

圖2 橋梁水下潛水檢測作業

從過去各州橋梁災害經驗發現，不僅長橋或具高沖刷潛勢(Scour Potential)跨水橋梁需要進行橋梁水下檢測，更多橋梁災害則是發生於短跨橋梁(Small-Span Bridge)，故而不少州運輸廳下調橋梁水下檢測的標準，或縮短橋梁最小跨度，或改採最小通水面積(Hydraulic Opening)為執行橋梁水下檢測的啟動依據[26]。

美國聯邦公路總署頒布的國家橋梁檢測標準，以及各州運輸廳頒布的公路相關橋梁/結構物檢測手冊[3, 4, 10, 11, 13, 27-30, 32, 34, 35]，將橋梁水下檢測明確定義為：「主要檢測橋梁下部結構的水下部分構件與周圍河道，在低水位時無法以涉水或探測(Probing)方式(如圖1所示)進行目視檢測，通常需改採潛水作業或其他適當的技術進行之檢測。」

橋梁水下檢測通常60個月檢測一次，但僅適用於狀況良好的結構，或該時間範圍內與當前條件下，無需頻繁地監測的結構；在考慮橋梁建材(Construction Material)、周遭環境、結構年齡(Age of Structure)、沖刷特性(Characteristics)、過去狀況評等等因素，具有部分損傷、位於不穩定河道(Unstable Channel)，或具侵犯性環境(Aggressive Environment)中的水下構件，個別橋梁需採用較短的橋梁水下檢測週期[4]，甚至部分州運輸廳可依水下構件/河道/沖刷個別的劣化評等狀況，將水下檢測週期縮短為12, 24, 36或48個月不等[26, 29-36]。另外，各州運輸廳可經由聯邦公路總署批准之下，其橋梁水下檢測週期最高可延長至72個月[3, 4, 10, 11, 13, 26, 27, 30]，但目前並未有任何州獲得聯邦公路總署批准[268]。

按國會議案要求，美國陸軍工兵團(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)轄屬橋梁須符合國家橋梁檢測標準(NBIS)要求，故亦有與聯邦公路總署相似的橋梁檢測制度與規定[37, 38]，其中橋梁水下檢測的定義與聯邦公路總署相仿，惟明訂橋梁水下檢測的起始低水位深度為3英呎(約90公分)[37]。

二、水下檢測的等級

傳統人工水下作業(以下簡稱潛水)發展自近海潛水產業，原先約定俗成的檢測強度的等級(Level)劃分逐漸廣泛為各界接受(包括美國海軍)，之後聯邦公路總署的水下檢測手冊[4, 27]、美國土木工程師學會(American Society of Civil Engineers, ASCE)手冊[39]，以及美國陸軍工兵團(USACE)[39, 40]均採納該水下檢測等級的劃分方式，該檢測等級通常與水下工作量呈現高度相關，等級越高者工作量越大。目前以潛水方式進行之水下檢測等級概分為三級，詳述如下三個小節[3, 4, 27-29, 32, 36-41]。

(一) 第一級(Level I)檢測

近距離目視與觸摸檢測(Tactile Inspection)

(或稱觸診)，或稱游過檢測(Swim-by Inspection)，但應足夠詳細檢測水下構件明顯的損傷或劣化，並確認所有構件尺寸的連續性(Continuity)，以及探知應埋構件的外露(Exposure)或底部掏空(Undermining)部分，僅作最小程度的表面清理。

倘若河水能見度很差，以至於潛水檢查員無法目視檢測結構，則轉而進行觸覺檢查，以手和手臂進行系統性掃掠運動(Sweeping Motion)，完成整個水下結構檢測工作；第一級檢測可包括對相鄰河床有限度的探測工作。

第一級檢測結果需能概述下部結構的總體狀況，並能驗證實際竣工狀況，提出第二級或第三級檢測需求，界定更詳細檢測的範圍與位置[3, 4, 34-37, 39]。

(二) 第二級(Level II)檢測

屬於詳細檢測，針對水下構件關鍵的位置或構件，進行水生附著物(Biofouling)部分的擦拭(Wiping)或刮除(Scaping)等清理工作，缺陷與劣化尺寸有限度的量測，並明確記錄損傷種類、位置、範圍和嚴重程度(如圖3所示)，清除

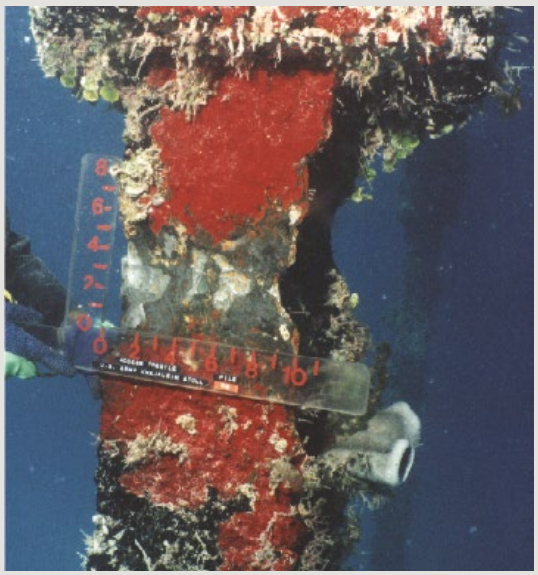

圖3 第二級檢測清理H型鋼樁與量測缺陷尺寸[4]

位置的選擇，應盡量降低對結構造成損壞的可能性[3, 4, 35-37, 39, 40]。

相關檢測手冊均提及清除工作的位置與範圍：(1)位置通常靠近低水線(Low Waterline)、靠近河床泥線(Mudline)，以及低水位線與河床泥線間的中間位置；(2)圓樁型結構應在指定位置清除6~12英吋(15~30.5公分)的帶高，最好為10~12英吋(25~30.5公分)的帶高；(3)在矩形樁(Rectangular Pile)上，應清除至少三個側面；(4)在八角樁(Octagonal Pile)上，應清除至少六個側面；(4)在圓樁上，應清除至少四分之三的周長；(5)在H型樁上，應清除翼板(Flange)的外表面、一個翼板的內表面，以及腹板(Web)的一側[3, 4, 28, 35-37, 39, 40]。

第二級檢測旨在檢測和辨識可能被表面生物污垢(Biofouling Growth)，或腐蝕產物所隱藏的損傷和劣化區域，清潔的徹底性(Thoroughness)應取決於辨識底層材料狀況，通常不需完全移除所有的生物污垢生長或腐蝕產物[3, 4, 28, 36, 37, 39, 41]。

(三) 第三級(Level III)檢測

對關鍵結構或結構構件，或考慮進行大範圍維修或更換的構件，進行廣泛性的清理，使用非破壞性試驗(Non-Destructive Testing, NDT)(超音波檢測Ultrasonic Testing、現地硬度試驗In-Situ Hardness Testing等)(如圖4所示)，或部分的破壞

圖4 第三級檢測超音波厚度檢測[4]

性檢測(Partially-Destructive Testing, PDT，即鑽心取樣Coring)等高強度的詳細檢測，在關鍵結構區域、可疑區域，以及能代表整個水下結構的區域，探知隱藏的或迫近的(Imminent)損傷，橫截面積的損失(Loss of Cross-Sectional Area)，並評估材料的均勻性(Homogeneity)[3, 4, 36, 37, 39-41]；建議取樣尺寸最高上限為水下構件的5%，至多30個構件[39]。

有關水下構件之取樣尺寸與抽樣比例，則可參考澳洲新南威爾斯州政府(New South Wales Government, NSW Government)運輸廳(Transport for NSW, TfNSW)建議如下：(1)取樣直徑介於40~75公釐之間，並確保取樣周界與埋置鋼筋(Rebar)之間，保留至少有25公釐的距離[42]；(2)有關水下構件代表性選擇的清理與檢測，則建議抽選數量/比例如表3所示，在感潮河段的橋梁基礎，一律採高壓水柱清理(High-Pressure Water Cleaning)水下構件表面，以俾進行詳細檢測[42]。

表3 水下檢測建議抽選數量/比例(摘自[42])

基樁總數(根)	抽選代表數量或比例	高壓水柱清理比例
1~20	全部	50%
21~66	20根	
67~96	全部的30%(取最近整數)	
97~150	30根	
151以上	全部的20%(取最近整數)	

三、水下檢測的分類

美國聯邦公路總署編訂的橋梁水下檢測手冊[3, 4, 27]認為：橋梁水下檢測需類比常規橋梁檢測的思維，橋梁擁有者應針對橋梁水下構件，制定相關標準以進行初始檢測(Initial Inspection)、定期檢測(Routine Inspection)、深入檢測(In-Depth Inspection)、特別檢測(Special Inspection)，以及損傷檢測(Damage Inspection)。

(一) 初始檢測：橋梁首次或登錄檢測成為橋梁登錄清單的一部分，須提供所有的結構登錄清單(Structure Inventory)、評估資料(Appraisal Data)，以及其他相關數據，建立橋梁結構狀況的基準值(Baseline)。當結構的配置發生變化，例如加寬、加長或補強、橋梁替換，或所有權變更時，亦可能需進行登錄檢測。初始檢測與定期檢測要求相仿，通常包括：第一級檢測與第二級檢測，以及沖刷調查。初始檢測可能表明需在某些區域進行深入檢測，以確認第一級檢測與第二級檢測時發現的異狀，或取得額外資料，以便確切地評估橋梁結構狀況。

(二) 定期檢測：確定橋梁的物理(Physical)和功能(Functional)狀況所需的觀察和測量，以辨識現況與初始或前次檢測狀況間，是否產生任何的變化，並確保橋梁結構得以繼續滿足當前的服務要求。定期檢測應包括第一級檢測、第二級檢測，以及沖刷調查，相關配置如表4所示，其中基本沖刷

表4 美國橋梁水下定期檢測配置表[4]

第一級檢測	100%水下構件
第二級檢測	10%水下構件
沖刷調查	河道橫斷剖面，探測水下構件附近底部

調查應包括探測結構相鄰的河床狀況，並確定橋梁範圍的河道橫斷剖面[28-32, 35, 36]。定期檢測可能表明需在某些區域進行深入檢測，以確認第一級檢測與第二級檢測時發現的異狀，或取得額外資料，以便確切地評估橋梁結構狀況。

(三) 深入檢測：對水面以上或水下的一個或多個構件進行近距離檢查(Close-Up Inspection)，以辨識在定期檢測程序中，不易檢測的缺陷。對於水下構件，可包括額外的第二級檢測或第三級檢測。下述一種或多種情況可能表明需要進深入檢測：(1)定期檢測的結果具不確定性；(2)重要結構的損失將對生命或財產造成重大影響；(3)結構獨特對結構性能造成不確定性；(4)遇險的先前證據；(5)考慮重新利用現有的下部結構，支撐新建的上部結構，或計畫對上部結構進行重大修復。對於某些橋梁，例如長期處於活躍腐蝕環境中的鋼樁結構，可能有必要將第三級檢測的非破壞性試驗(NDT)，列為定期檢測的一部分。

(四) 特別檢測：由橋梁擁有者自行決定安排的檢測，用於監測特定已知或可疑的缺陷。可能觸發需要進行之損傷檢測、深入檢測或特別水下檢測的條件或事件，包括但不僅限於以下項目：(1)異常洪水；(2)船隻撞擊(Vessel Impact)；(3)不尋常的浮冰(Ice Floes)；(4)船舶螺旋槳引發的渦流沖洗(Prop Wash)，可能導致沖刷水流；(5)不利的環境條件，例如微鹹水(Blackish Water)、污染水，以及含有高濃度化學物質的水；(6)橋墩或橋台(Abutment)處漂浮和堆積的碎屑(Debris)，可能導致局部沖刷(Local Scour)增加；(7)發現水面上構件處劣化或位移的證據；(8)發生重大地震或其他重大自然事件。

(五) 損傷檢測：非排程的檢測，用以評估由環境因素或人為行為造成的結構損傷。檢測的範圍應足以確定緊急載重限制(Emergency Load Restriction)的需要，並評估完成所需維修的效果等級。

伍、水下儀器檢測技術

一、概述

橋梁水下檢測作業常受水域的能見度、水流、天候(Weather)、水深、水上交通、攜行檢測工具，以及檢測可及性(Accessibility)等條件限制[3, 4, 36, 37, 39, 41-44]，而最關鍵因素是潛水員需在低能見度與高水流下，進行高風險性橋梁水下檢測，且檢測效果通常並不佳，拍照及攝影需視水中的透視度好壞而定。

採用潛水作業方式進行橋梁水下檢測，橋梁潛水檢測員需要以觸診，以及人工測量/記錄數個深度與寬度數據，雖然許多美國各運輸檢測單位仍沿用這些舊方法，但此一潛水檢測過程已被證明效率低下，且並不精確[26]。

再者，雖然美國聯邦公路總署(FHWA)頒布國家橋梁檢測標準(NBIS)[12]、美國聯邦公路總署編訂的橋梁檢測員參考手冊(BIRM)[3]與橋梁水下檢測手冊[4]，以及美國國家公路與運輸官員協會(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)編定的橋梁評估手冊(Manual for Bridge Evaluation, MBE)[11]均允許採用「其他適當的技術」，以便取得完整、精確的河道深度資料，以及水下構件的損傷狀況，倘若驟然採用所謂的「其他適當的技術」而省卻潛水作業，勢將違背美國橋梁水下檢測作業中既有的『水下檢測等級』觸診執行的要求。

目前美國聯邦公路總署不允許單獨以「其他適當的技術」的檢測成果，取代潛水作業方式取得的檢測成果[45]，換言之，「其他適當的技術」僅能扮演橋梁水下檢測的輔助角色，在考量潛水員安全性之下，用以彌補潛水作業方式的不足處。

以潛水作業方式的目視與觸診方式，依舊可獲得有價值的現況訊息[45]，故而目前美國聯邦公路總署並未有結論性的改進構想或方向，未因新的檢測技術的發展或引進，而淘汰既有的潛水作業方式，橋梁水下檢測仍維持潛水作業方式，以及其他適當技術兩種方式共存，並無相互取代的爭議。

二、儀器檢測技術

彙整水下檢測技術相關書籍、研究報告/論文，以及橋梁檢測手冊[3, 4, 20, 22, 24, 26, 35-37, 39-57]，儀器檢測(Instrumentation Inspection)技術可劃分為：(1)光學影像技術(Optical Imaging Technique)、(2)非光學影像技術(Non-Optical Imaging Technique)，以及(3)非/半破壞性試驗(NDT/PDT)儀器等三大類檢測技術，檢測技術概述如後。

光學影像技術概以水下照相與水下攝影最為廣泛，光學影像技術計有水下照相機、水下攝影機(Underwater Video)、照明(Lighting)、清水箱(Clearwater Box)、圖形比例尺(Graphic Scale)等設備(如圖5所示)，提供經濟、快速的檢測紀錄方式，可部分克服水中能見度、水流、碎屑阻隔等各種水中狀況[3, 4, 20, 22, 24, 31, 36, 37, 39-44, 49, 50]。

非光學影像技術包括：雷射、雷達(Radio Detection and Ranging, Radar)，以及聲納、水上地電阻影像(Electric Resistivity Tomography, ERT)

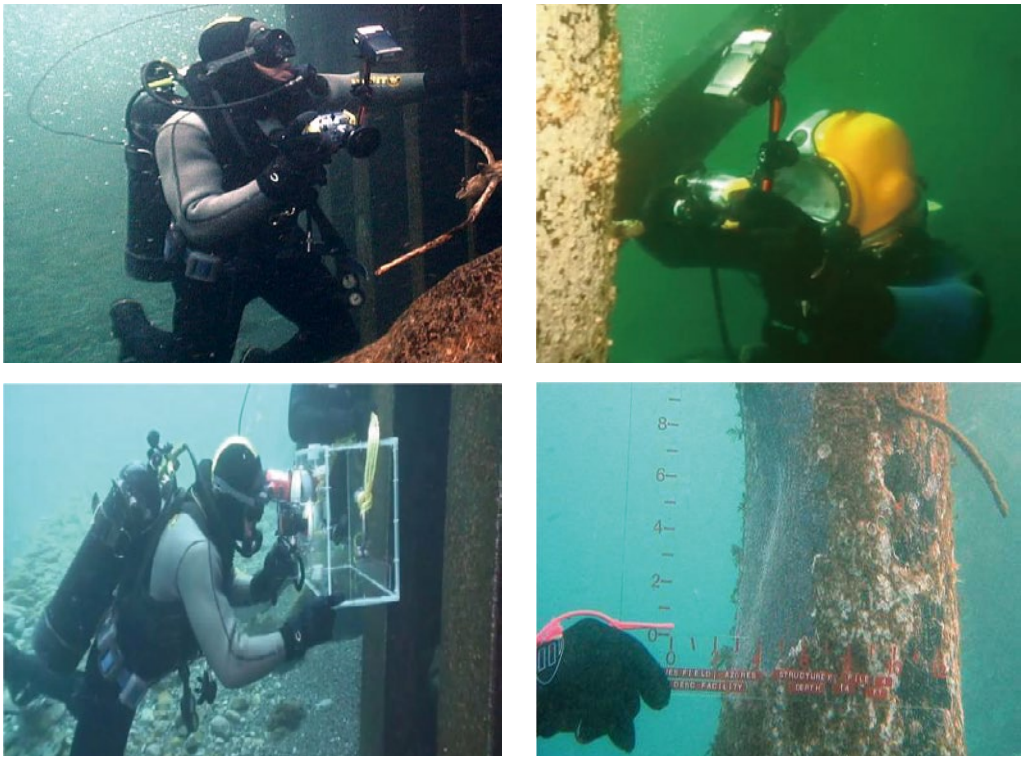

圖5 水下光學影像技術設備[4]：(左上)水下攝影機；(右上)水下照相機；(左下)透明水箱；(右下)圖形比例尺

等技術[22, 24, 45-52]，其中雷射(或稱光達)可產生極其準確的水下影像，但水的能見度較差時，光達探測範圍將受限，故光達廣泛應用於離岸(Offshore)海洋結構物掃描，因跨河橋梁的河水通常較為混濁，光達技術並不適合一般橋梁水下檢測之用，光達應用於橋梁檢測，多側重於水面以上橋梁與高灘地(Floodplain)的地表物體影像/地形掃瞄之用[24, 45, 53-56]，其餘非光學影像技術均可有效克服河水混濁能見度不足的問題，並可採傳統船舶(Traditional Manned Ship)或無人載具方式進行檢測。

上述非光學影像技術中，尤以聲納最廣為使用，聲納探測儀類型種類繁多，可針對水下構件缺陷劣化狀況、河床地形、沖刷回淤(Refill)、地層構造等進行掃描探測，其中多音束聲納(Multibeam Sonar)可隨著船舶移動進行大範圍掃描，多次掃描或重疊航行獲得更多的點雲密度，以及100%的河床覆蓋率，可判定水下異常或障礙物、水下構件剝落(Scaling)深度，或基礎掏空深度；圖6與圖7顯示由人工水下檢測結果發現橋墩基礎掏空外露，基礎表面混凝土劣化剝離(Spalling)，經緊急搶修，採用多音束掃描帶聲納探測，可清楚點繪橋墩補強前後，橋墩

圖6 以多音束聲納掃描帶聲納掃描橋墩基礎弱化與混凝土劣化三維點雲圖[57]

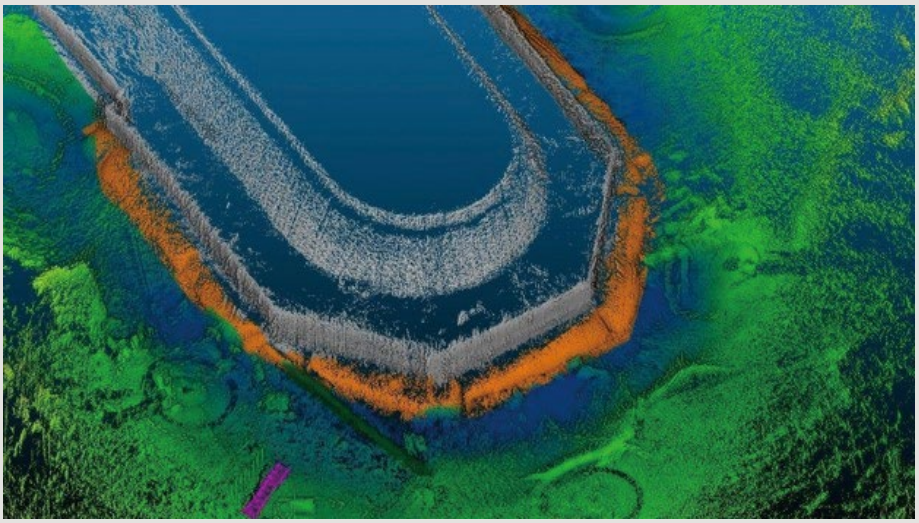

圖7 以多音束聲納掃描帶聲納掃描橋墩基礎補強後三維彩繪點雲圖[57]

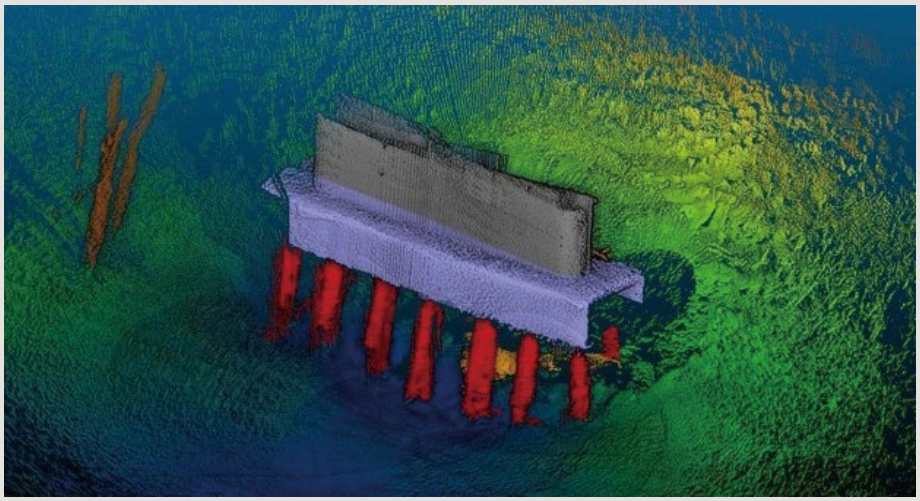

圖8 以多音束聲納掃描帶聲納掃描橋墩基礎嚴重沖刷之三維彩繪點雲圖[57]

修復狀況[57]；洪災後橋墩基礎嚴重沖刷，透過多音束掃描帶聲納探測如圖8所示，可發現橋墩最嚴重深達2.4公尺深的基礎掏空，並漂流木堆積於基礎底部與周圍[57]。

側掃聲納(Side Scan Sonar)裝設於船舶的拖魚(Towfish)、測量船的橫梁或船身，或潛水器上，隨船舶向前移動，側掃聲納向航線兩側發射扇狀脈衝波，具有快速有效探測大範圍河道底部圖像，提供河床堤岸與橋墩正視影像的能力，並可用於多種用途探測目的，如地質構造、水下構件、拋石、河道地形、水下碎屑物等，例如某座大橋在歷次橋梁檢測素有沖刷疑慮，圖9顯示側掃聲納結果[58]，可清楚標繪基

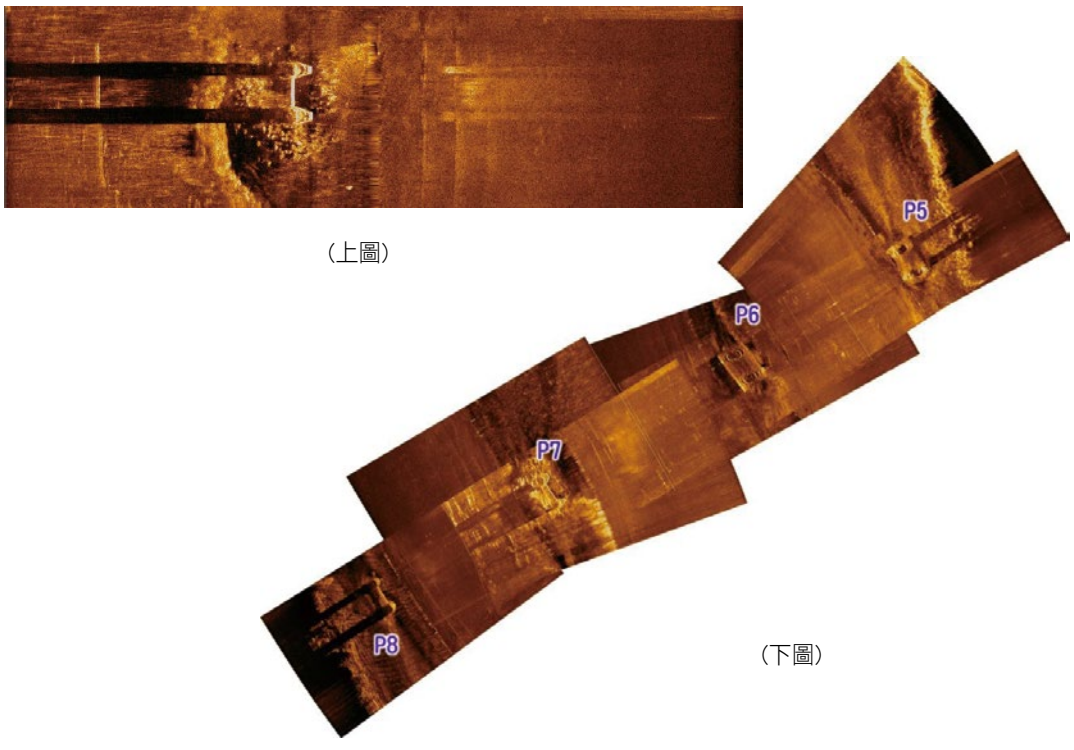

圖9 側掃聲納成像圖：(上圖)單條測線影像圖；(下圖)側掃聲納影像鑲嵌圖[58]

礎形狀，橋墩後有強烈的墩柱陰影，橋墩周圍有淺薄的沖刷坑陰影。

橋梁水下檢測使用的非/半破壞性試驗儀器，以提供鋼構與混凝土的水下第三級檢測需求，計有超音波厚度檢測儀(Ultrasonic Thickness-Measuring Device)、水下磁粒檢測設備(Underwater Magnetic Particle Testing Equipment)、超音波脈波速度計(Ultrasonic Pulse Velocity Meter; V-Meter)、施密特錘(Schmidt Hammer; Rebound Hammer)、鋼筋定位器(Rebar Locator; R-Meter)等儀器，以及鑽心取樣設備(Coring Equipment)(如圖10所示)[3, 4, 36-38, 40, 44, 59]。

另者，沿橋址處或於橋墩處，以儀器或人工方式量測基礎沖刷設備或裝置，本研究統稱為定點式沖刷量測技術(Fixed-Position Scour Measurement Technology)，雖非歸屬於橋梁水下檢測一環，亦非能充分代表橋墩基礎沖刷現況，但仍為目前橋管單位面對橋梁基礎沖刷問題，最常採用的、最簡便的量測方式。

定點式沖刷量測技術種類繁多，例如：比對多次制式水準儀(Level)或測深儀量測河道斷面(Streambed Profile)變化，由河道剖面變化確認橋址處的沖刷位置，或於橋址河道埋設沖刷磚、埋入式無線電波漂浮裝置(Buried Float-Out Buoys)，固定於橋墩的重錘式沖刷計(Dropping Weight Scour Measurement)、重力鋼棒(Mechanical Sounding Rod)、磁性滑動套環(Sliding Magnetic Collar, SMC)、時間域反射儀(Time Domain Reflectometry, TDR)、光纖沖刷監測計(Optic Fiber Scour Monitoring System)、水下照相機、水下攝影機、壓電片沖刷監測計(Piezoelectric Film Type Scour Monitoring System)等數種沖刷量測裝置，定點量測橋墩或橋址處的沖刷深度(如圖11所示)[3, 9, 44, 48, 51, 52, 60]。

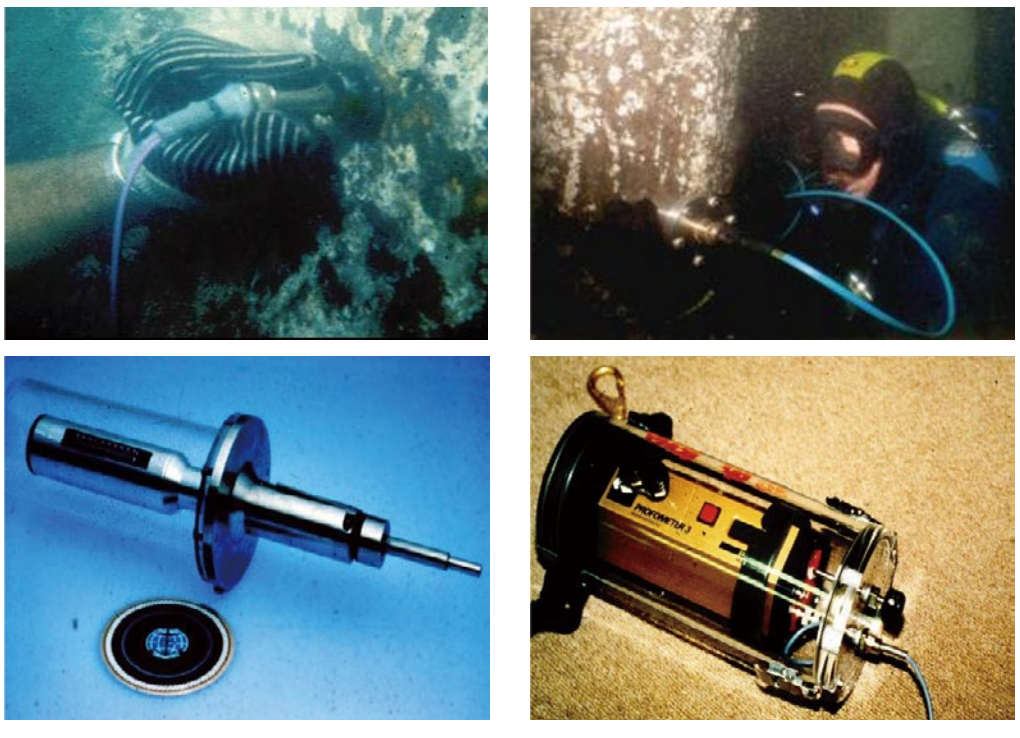

圖10 水下非破壞性試驗儀器[4]
(左上)超音波厚度檢測儀；(右上)超音波脈波速度計；(左下)施密特錘；(右下)鋼筋定位器

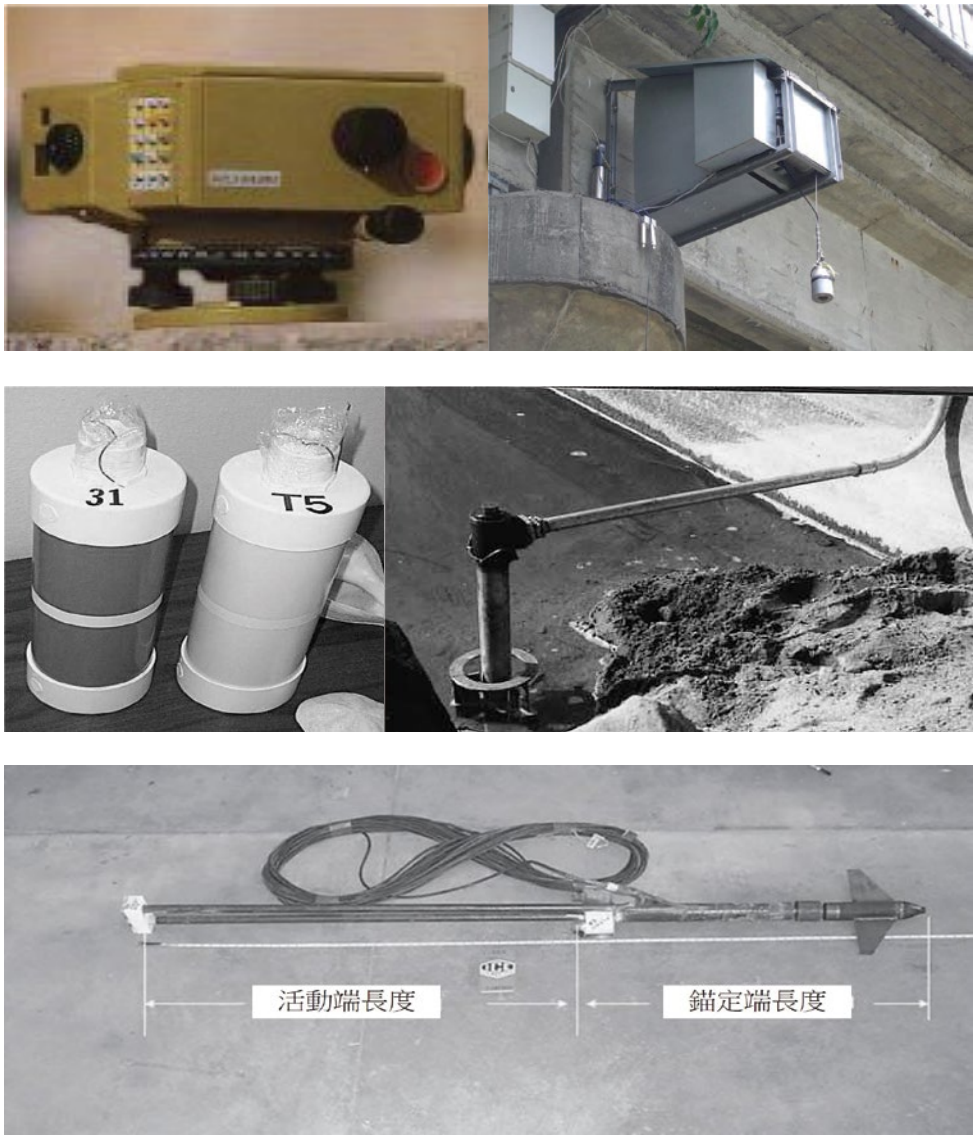

圖11 定點式沖刷量測設備：(上左)水準儀[52]；(上右)重錘式沖刷計[52]；(中左)埋入式漂浮裝置[60]；(中右)磁性滑動套環[60]；(下)時間域反射儀[60]

陸、國內橋梁水下檢測制度

目前依交通部頒訂的公路養護規範[1]內容定義，橋梁水下檢測當屬橋梁檢測類別的詳細檢測選項之一，詳細檢測係於定期檢測或特別檢測後，若檢測人員對所發現之橋梁劣化現象無法確定其影響程度，或對可能發生但目視無法判斷是否劣化而有安全疑慮時，例如：裂縫之深度、混凝土內部鋼筋或鋼腱(Tendon)銹蝕狀況、跨河橋梁(Cross River Bridge; River-Crossing Bridge)所在河道狀況、基礎沖刷情形等，需以儀器或相關設備進行局部破壞試驗(或稱半破壞試驗)或非破壞試驗等檢測，可根據不同目的選擇適當的工具(Tool)、儀器、設備，以及方法(Method)。

綜合交通部頒訂的公路橋梁檢測及補強規範[5]，以及橋基保護工設計規範[6]相關敘述，

橋梁水下檢測項目可區分為：(1)橋梁水下結構劣化缺陷狀態，(2)河道狀況，以及(3)臨水引道路堤基礎與橋梁基礎沖刷狀況等三類。

交通部頒訂的公路橋梁檢測及補強規範[5]，於詳細檢測特列「跨河橋梁所在河道狀況或基礎沖刷之檢測」一項，內容提及「常用檢測方法包含河道橫斷面測量(Streambed Profiling)、單音束測深(Single-Beam Echo Sounder)、多音束測深、側掃聲納、測海深光達(Bathymetric LiDAR)、水下無人載具(UUV)攝影或委由專業潛水人員(Professional Diver)進行等。」

目前我國橋梁水下檢測尚屬啟動階段，除以船舶搭載聲納量測河道狀況較為普遍之外，其餘檢測項目均較少觸及，概與水下檢測環境相對危險、專業人力有限、檢測訓練要求未明、檢測經費配置較少、水下檢測市場生態封閉等因素，限制執行橋梁水下檢測的強度。

柒、國內橋梁水下檢測展望

本研究檢視美國、挪威、丹麥、瑞典、芬蘭、德國、法國、英國、澳洲、紐西蘭、日本、加拿大、中國大陸等十三國的橋梁檢測作業，針對國內橋梁水下檢測特性，綜合梳理出國內橋梁水下檢測未來努力發展的方向：

一、釐清橋梁水下檢測定義

我國相關橋梁檢測規範並未明確定義橋梁水下檢測相關內容，建議明確規範橋梁水下檢測相關範疇如後：「橋梁水下檢測主要係檢測橋梁下部結構的水下部分構件、周圍水道狀況(含水工結構物)，以及沖刷狀況，於河川枯水位期(或低水位期)，橋梁檢測員無法於岸上或橋上採用目視、簡單設備/儀器，或採涉水方式探知橋墩/橋台，以及橋墩/橋台基礎等水下構件、水道(含水工構造物)等相關單元的缺陷劣化狀況，即未能以常規橋梁檢測進行之水下構件、水道等相關單元件的缺陷劣化狀況，需改採人工潛水作業(Manual Underwater; Diving/Dive)或儀器檢測技術進行之檢測。」

二、橋梁水下檢測施測對象

長橋與具高沖刷潛勢跨水橋(按訂定跨河橋梁橋基沖刷檢測作業規範(草案)之研究[9]定義之沖刷潛勢)需進行橋梁水下檢測，另建議針對一般短跨橋梁災損進行研究，是否縮短橋梁跨度，或改採最小通水面積為執行橋梁水下檢測的啟動依據。

三、針對在現有橋梁檢測規範下，即反應式檢測模式之下，建議橋梁水下檢測啟動時機

(一) 依交通部頒訂的公路養護規範[1]所述定期檢測或特別檢測後，若檢測人員對所發現之橋梁劣化現象無法確定其影響程度，或對可能發生但目視無法判斷是否劣化而有安全疑慮時，例如：跨河橋梁所在河道狀況、基礎沖刷情形等，需以儀器或相關設備進行局部破壞試驗(或稱半破壞試驗)或非破壞試驗等檢測選項。

(二) 交通部頒訂的公路養護規範[1]所述「定期檢測或特別檢測後，認為有必要時進行之」，其中「必要時」可考慮當跨河橋(含跨水橋)以下狀況：(a)水面以上構件發生明確傾斜、位移、沉陷等證據；(b)橋墩或橋台基礎裸露、掏空達20%設計埋置深度以上；(c)發生異常洪水、重大地震事件有影響開放通車之虞；(d)橋墩或橋台處漂浮與堆積的碎屑，可能導致局部沖刷增加；(e)船隻撞擊；(f)發生異常洪水事件導致河道變遷，或橋址處水工結構物受損。

(三) 擬進行橋梁安全性評估或整建：(a)臺灣地區橋梁管理資訊系統(TBMS)資料庫內查無相關橋梁水下檢測紀錄，或曾執行水下檢測但遺失紀錄，但需了解橋梁水下構件與河道狀況，以俾進行橋梁相關安全性分析或建立初始資料；(b)考慮重新利用現有的下部結構，支撐新建的上部結構，或計畫對上部結構進行重大修復；(c)結構獨特對結構性能造成不確定性等狀況，建議啟動橋梁水下檢測；(d)不利的環境條件，例如：河口附近、感潮河段、沿海地區、污染水，以及含有高濃度化學物質的水。

四、橋梁水下檢測週期方向

考量臺灣地理環境特性，以及多數國家均有明定橋梁水下檢測週期，本研究建議未來宜明定橋梁水下檢測週期，即為預防式檢測思維，以下為建議的橋梁水下檢測週期方向：

(一)橋梁下部結構的水下部分構件、周圍河道狀況，以及沖刷狀況，在低水位時無法以涉水或探測方式進行目視檢測，通常需採橋梁水下檢測為之，目前臺灣橋梁水下檢測屬於詳細檢測選項之一，然臺灣橋梁時受颱風與豪雨引發洪水之威脅極甚，倘若僅列於詳細檢測選項之一，恐難以反映橋梁水下現況，建議將橋梁水下檢測列入定期檢測一環，檢測最高週期為48個月一次，檢測週期報請主管機關核可後，容許放寬至60個月；顧及橋梁水下檢測的難度與專業性，建議與常規橋梁檢測作業標案切割辦理，可採數橋合併招標方式辦理；橋梁水下檢測時機建議於枯水期辦理，以俾一併檢視橋墩基礎裸露與水下構件損傷狀況。

(二) 前述橋梁水下檢測週期僅適用於狀況良好的結構，或該時間範圍內與當前條件下，無需頻繁地監測的結構；考慮橋梁重要等級、沖刷特性、過去評等狀況、橋梁建材、周遭環境、結構年齡、海岸天候腐蝕等因素，具有部分損傷、位於不穩定河道，或侵犯性環境中(例如：河口、感潮河段、沿海地區等)的水下構件，個別橋梁需採用較短的橋梁水下檢測週期，可下調至36個月一次，倘構件損傷嚴重或沖刷狀況惡劣，或於重大洪水事件之後，檢測週期縮限至6~24個月。

五、河道/沖刷狀況之檢測範圍

目前臺灣僅在橋梁目視檢測提及需紀錄上下游各500公尺內構造物狀況，有關橋梁水下檢測作業，並無確切規範河床地形量測的範圍，然而鑒於臺灣橋梁分布密集，可採用同一流域多座跨河橋梁合併，進行河床斷面/沖刷量測；另，美國聯邦公路總署頒布之橋梁水下檢測手冊[4]，檢測範圍描述如下(原文為經驗參考分享性質，並未強制要求)：「通常實務做法為至少在每個下部結構單元周圍，以及沿著橋梁的上游與下游帶，以橋梁上游和下游每隔50英呎(約15公尺)、100英呎(約30.5公尺)，以及200英呎(約61公尺)的方式，進行河床地形探測作業；對於長橋，一些檢測員建議將河床地形調查範圍，延伸至橋梁上游與下游之距離均為河道寬度的兩倍。」相關說明可作為國內河道/沖刷狀況檢測範圍之參考。

六、橋梁水下檢測作業方式區分

考慮橋梁水下檢測時，因涉及檢測標的位置與範圍、有限的執行經費、可動用的檢測技術，以及業主的相關要求等主客觀條件，檢測團隊可能採取的橋梁水下檢測方式計有：(1)僱用傳統人工水下(潛水)手持檢測儀器/設備方式；(2)自有、租用或僱用傳統載人水面船舶固定、附掛、拖引或拖曳檢測儀器/設備方式；(3)

自有或租用水面及水下無人載具(包括水面無人船Surface Vessel Vehicle, SVU與遙控潛艇ROV)附設檢測儀器/設備方式，進行橋梁水下檢測作業。

七、橋梁水下檢測方式共存性

雖人工潛水作業檢測方式已被證明效率低，且並不精確，且亦有其他適當的儀器檢測技術可供選擇，然人工潛水作業方式的目視與觸診方式，仍可獲得有價值的水下構件缺陷劣化訊息；換言之，在潛水員安全考量之下，儀器檢測技術能扮演橋梁水下檢測的輔助角色，用以彌補潛水作業方式的不足處，故而世界各國橋梁主關單位未因新的檢測技術的發展或引進，而淘汰既有的人工潛水作業方式，橋梁水下檢測仍可維持人工潛水作業方式，以及儀器檢測技術兩種方式共存。

八、人工水下潛水檢測的制度合理化

人工潛水檢測屬高危職業，職業保險承保受限，目前人工潛水檢測的生態，均採承攬再承攬模式，由再承攬者自行招募潛水員執行實際潛水作業，人員資格、潛水裝備、人力配置、作業程序、操作方式等較無合宜有效的品質管控，潛水員熟悉當地水性較諸具備檢測專業技術重要，潛水員的健康、裝備、安全等方面衍生問題，幾乎均由潛水員自行承擔與吸收，有專業技術的潛水員不一定願意參與橋梁水下檢測，既有的法規與實際執行面之間存在相當的鴻溝，如何在潛水員的健康與安全前提下，結合相關產業的專業證照，相關部會需就此研修具可行性的法規，同時將安全潛水實務手冊(Safety Diving Practice Manual)，以及潛水作業計畫(Dive Operations Plan)(包括工作危害分析Activity Hazard Analysis、風險評估研擬Risk Assessment，以及應變管理計畫Emergency Management Plan)等安全保障措施，納入適當單位審核與評估，逐漸將現有人工潛水檢測模式導引至合理的正軌上，係為未來人工潛水檢測亟待努力的方向。

九、橋梁水下檢測技術適用性

橋梁水下檢測作業常受水域的能見度、水流、天候、水深、水上交通、攜行檢測工具，以及檢測可及性等條件限制[3, 4, 36, 37, 39, 41-44]，而最關鍵因素係需在低能見度與高水流下，進行高風險性橋梁水下檢測，且檢測效果通常並不佳，光學影像技術需視水中的透視度好壞而定，非光學影像技術探測能力則可不受水中能見度影響。

誌謝

本文係財團法人中華顧問工程司「水面及水下無人載具自動橋梁檢測的評估和應用」研究案之部分成果，作者由衷感謝財團法人中華顧問工程司的支持與協助，在此一併申謝。

參考文獻

1. 交通部(2018)，公路養護規範，交通部頒布，臺北，臺灣。

2. 姚乃嘉，廖先格，莊友涵(2012)，「臺灣地區橋梁管理資訊系統」，橋梁維護管理技術種子教師培訓計畫—培訓課程論文集，臺北，臺灣，第251-338頁。

3. Ryan, T.W., Lloyd, C.E., Pichura, M.S., Tarasovich, D.M., and Fitzgerald, S. (2022), Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM), FHWA Report No. FHWA-NHI-21-002, National Highway Institute

(NHI), Federal Highway Administration (FHWA), Vienna, Virginia, U.S.A.

4. Browne, T.M., Collins, T.J., Garlich, M.J., O' Leary, J.E., Stromberg, D.G., and Heringhaus, K.C. (2010), Underwater Bridge Inspection, FHWA Report, Report No. FHWA-NHI-10-027, Office of Bridge Technology, FHWA, Washington, D.C., U.S.A.

5. 交通部(2018)，公路橋梁檢測及補強規範，交通部頒布，臺北，臺灣。

6. 交通部(2011)，橋基保護工設計規範，交通部頒布，臺北，臺灣。

7. 邱永芳，謝明志，柯正龍，林雅雯，王仲宇，連惠邦，楊明德，李維峰，陳銘鴻，胡志昕，劉興昌，洪紹勛，張為光，柯永彥，鄭世豪，梅興泰，黃進國，蔡明邑，羅冠顯(2011)，訂定跨河橋梁橋基沖刷檢測作業規範(草案)之研究，交通部運輸研究所委託報告，報告編號：MOTC-IOT-98-H1EB008，臺北，臺灣。

8. Chavel, B.W. and Yadlosky, J.M. (2011), Framework for Improving Resilience of Bridge Design, FHWA Report No. FHWA-IF-11-016, Office of Bridge Technology, FHWA, Washington, D.C., U.S.A.

9. Lee, G.C. (2013), "Development of Reliability-Based Bridge Limit States for Extreme Loads-Recent Progress," Proceedings of the 9th US-Taiwan Bridge Engineering Workshop, Taoyuan, Taiwan, pp. 15-32.

10. FHWA (2022), "National Bridge Inspection Standards (NBIS)— 23 CFR Part 650," Federal Register, Vol.87, No.88, pp. 27396-27437.

11. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2018), The Manual for Bridge Evaluation (MBE), 3rd Edition, AASHTO, Washington, D.C., U.S.A.

12. Everett, T.D., Weykamp, P., Capers, H.A., Cox, W.R., Drda, T.S., Jensen, P., Juntunen, D.A., Kimball, T., and Washer, G.A. (2008), Bridge Evaluation Quality Assurance in Europe, FHWA Report, Report No. FHWA-PL-08-016, FHWA, Arlington, Virginia, U.S.A.

13. Hearn, G. (2007), Bridge Inspection Practices, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) No. 375, Transportation Research Board (TRB), Washington, D.C., U.S.A.

14. 蘇振維，張舜淵，楊幼文，江明益，黃俊豪，姚乃嘉，王仲宇，廖先格，葉啟章，許文科，任以永，魏薪怡(2018)，我國橋梁檢測方式之發展探究，交通部運輸研究所委託報告，報告編號：MOTC-IOT-105-PEB018，臺北，臺灣。

15. National Highways (2021), Design Manual for Roads and Bridges (DMRB)— Volume 3: Highway Structures: Inspection and Maintenance, National Highways, Guildford, United Kingdom.

16. Department of Transport and Main Roads, Queensland Government (2004), Bridge Inspection Manual, Registration Number: 80.640, 2nd Edition, Queensland Government,

Brisbane, Queensland, Australia.

17. VicRoads (2018), Road Structures Inspection Manual, Department of Transport, Victoria State Government, Melbourne, Victoria, Australia.

18. New Zealand Transport Agency (NZ Transport Agency) (2001), Bridge Inspection and Maintenance Manual, Manual Number: SP/M/016, NZ Transport Agency, Wellington, New Zealand.

19. 日本国土交通省(2019)，道路橋定期点検要領，国土交通省道路局，東京，日本。

20. 日本国土交通省(2019)，橋梁定期点検要領，国土交通省道路局国道技術課，東京，日本。

21. 日本国土交通省(2013)，総点検実施要領(案)―橋梁編，国土交通省道路局，東京，日本。

22. 日本国土交通省(2019)，水中部の状態把握に関する参考資料，国土交通省道路局国道技術課，東京，日本。

23. 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社(2022)，保全点検要領―構造物編，日本(株)高速道路総合技術研究所(NEXCO総研)，東京，日本。

24. 岐阜県県土整備部(2022)，岐阜県橋梁点検マニュアル，岐阜県県土整備部道路維持課，岐阜，日本。

25. 交通運輸部(2021)，公路橋涵養護規範，標準編號：JTG 5120-2021，交通運輸部，北京，中國。

26. Strock, T. and Browne, T.B. (2009), "Overview and Comparison of Nationwide Underwater Bridge Inspection Practices," Transportation Research Record, No. 2108, pp. 97-106.

27. Collins, T.J., Jarmakowicz, R.J., and Garlich, M.J. (1989), Underwater Inspection of Bridges, FHWA Report No. FHWA-DP-80-1, Demonstration Projects Division, FHWA, Washington, D.C., U.S.A.

28. Division of Maintenance, California Department of Transportation (Caltrans) (2018), Structures Maintenance & Investigations (SM&I) Inspection Procedures Manual, Division of Maintenance, Caltrans, Salinas, California, U.S.A.

29. Bridge Section, Idaho Transportation Department (ITD) (2022), Idaho Manual for Bridge Evaluation, ITD, Boise, Idaho, U.S.A.

30. Office of Bridges and Structures, Iowa Department of Transportation (IowaDOT) (2014), Bridge Inspection Manual, IowaDOT, Ames, Iowa, U.S.A.

31. Massachusetts Department of Transportation (MassDOT) (2019), Bridge Inspection Handbook, MassDOT, Boston, Massachusetts, U.S.A.

32. MnDOT Bridge Office (2017), State of Minnesota Bridge and Structure Inspection Program Manual, MnDOT Bridge Office,

Minnesota Department of Transportation (MnDOT), Oakdale, Minnesota, U.S.A.

33. Office of Structures, New York State Department of Transportation (NYSDOT) (2016), Bridge Inspection Manual, NYSDOT, Albany, New York, U.S.A.

34. Pennsylvania Department of Transportation (PennDOT) (2021), Bridge Safety Inspection Manual, 2nd Edition, PennDOT, Harrisburg, Pennsylvania, U.S.A.

35. Bridge Preservation Office, Washington State Department of Transportation (WSDOT) (2018), Washington State Bridge Inspection Manual, Manual No. M36-64.08, WSDOT, Olympia, Washington, U.S.A.

36. Bureau of Structures, Wisconsin Department of Transportation (WisDOT) (2017), Structure Inspection Manual, WisDOT, Madison, Wisconsin, U.S.A.

37. U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2020), Inspection and Evaluation of USACE Bridges, Engineer Manual No. EM 1110-2-1102, USACE, Department of the Army, Washington, D.C., U.S.A.

38. USACE (2020), USACE Bridges Safety Program, Engineer Regulation No. ER 1110-2-111, USACE, Department of the Army, Washington, D.C., U.S.A.

39. Childs, K.M. (2001), Underwater Investigations— Standard Practice Manual, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 101, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, Virginia, U.S.A.

40. Kelly, S.W. (1999), Underwater Inspection Criteria, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, U.S.A.

41. Chao, C. (2011), "History of Caltrans Underwater Investigations," Proceedings of the 7th US-Taiwan Bridge Engineering Workshop, Taipei, Taiwan, pp. 245-276.

42. Transport for NSW (TfNSW) (2021), Underwater Bridge Inspections, QA Specification B350, TfNSW, Sydney, New South Wales (NSW), Australia.

43. Browne, T.M., Collins, T.J., Garlich, M.J., O' Leary, J.E., and Heringhaus, K.C. (2010), Underwater Bridge Repair, Rehabilitation, and Countermeasures, FHWA Report No. FHWA-NHI-10-029, Office of Bridge Technology, FHWA, Washington, D.C., U.S.A.

44. Lamberton, H.C., Sainz, A.J., Crawford, R.A., Ogletree, W.B., and Gunn, J.E. (1981), Underwater Inspection and Repair of Bridge Substructures, NCHRP No. 88, TRB, Washington, D.C., U.S.A.

45. Shen, J., Forsyth, R., and Kilgore, R. (2018), Underwater Inspection of Bridge Substructures Using Imaging Technology, FHWA Report No. FHWA-HIF-18-049, Office of Infrastructure Research and Development, FHWA, Arlington, Virginia, U.S.A.

46. USACE (2013), Hydrographic Surveying, Engineer Manual No. EM 1110-2-1003, USACE, Department of the Army, Washington,

D.C., U.S.A.

47. Sun, K., Cui, W., and Chen, C. (2021), "Review of Underwater Sensing Technologies and Applications," Sensors, No. 21, Issue 23, 7879.

48. Wightman, W.E., Jalinoos, F., Sirles, P., and Hanna, K. (2003), Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems, FHWA Report No. FHWA-IF-04-021, Central Federal Lands Highway Division, FHWA, Lakewood, Colorado, U.S.A.

49. 社団法人全国地質調査業協会連合会(1997)，橋梁下部構造の計測・診断技術の開発に関する共同研究報告書—橋梁基礎の洗掘調査マニュアル(案)，日本建設省土木研究所共同研究報告書第157號，東京，日本。

50. 社団法人日本道路協会(2000)，既設道路橋基礎の補強に関する参考資料，社団法人日本道路協会，東京，日本。

51. 公益社団法人日本地盤工学会(2001)，地盤工程の地物探查技術応用事例集，公益社団法人日本地盤工学会，東京，日本。

52. 中國土木水利工程學會非破壞檢測委員會(2010)，橋梁檢測方法與應用，科技圖書，臺北，臺灣。

53. Browne, T.M. (2010), "Underwater Acoustic Imaging Devices for Portable Scour Monitoring," Proceedings of the 5th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5), San Francisco, California, U.S.A., pp. 931-940.

54. Muste, M., Hauet, A., Ho, H.-C., and Nakato, T. (2008), Quantitative Mapping of Waterways Characteristics at Bridge Sites, Report No. IHRB TR-569, Iowa Highway Research Board (IHRB), IowaDOT, Ames, Iowa, U.S.A.

55. Turkan, Y., Laflamme, S., and Tan, L. (2016), Terrestrial Laser Scanning-Based Bridge Structural Condition Assessment, Part of Project No. DTRT13-G-UTC37, Midwest Transportation Center, Office of the Assistant Secretary for Research and Technology, U.S. DOT, Ames, Iowa, U.S.A.

56. Kocak, D.M., Dalgleish, F.R., Caimi, F.M., and Schechner, Y.Y. (2008), "A Focus on Recent Developments and Trends in Underwater Imaging," Marine Technology Society Journal, Vol. 42, No. 1, pp. 52-67.

57. DeWall, P., Bartelt, N., Owens, G., and Lovelace, B. (2017), Multi-Beam Sonar Infrastructure Mapping Research, MnDOT Report No. MN-RC 2017-40, MnDOT, St. Paul, Minnesota, U.S.A.

58. 國立中央大學(2022)，109年第一區養護工程處因應氣候變遷橋梁安全維持計畫—台15線關渡橋檢測、監測及整體安全評估工作，公路總局第一區養護工程處，樹林，新北，臺灣。

59. Purvis, R.L. and Smith, W. (1994), Underwater Bridge Maintenance and Repair, NCHRP No. 200, TRB, Washington, D.C., U.S.A.

60. Hunt, B. (2009), Monitoring Scour Critical Bridges, NCHRP No. 396, TRB, Washington, D.C., U.S.A.