

石樑工法應用在農水路生態改善工程

Improvement of Ecology in the Irrigation Canals by the Application of Stone-beam Works

農業工程研究
中心工程組
研究員兼組長

萬能科技大學
營建科技系
講師

萬能科技大學
營建科技系
教授

中原大學
土木工程系
副教授

中原大學
土木工程系
研究生

陳 獻

謝 新 春

楊 紹 洋*

邱 金 火

李 俊 儒

Shinne Chen

Hsin-Chun Hsieh

Shaw-Yang Yang

Jin-Forie Chiou

Chun-Ju Li

摘 要

考慮水理安全和水域生態環境下，在不破壞原有結構物，將石樑工法應用在既有矩形混凝土內面農水路之生態改善，藉由渠底橫向堆石，增加水流歧異度和水體溶氧量。進行水工試驗，量測水位、流速、渠流能量損失及淤砂量等，分析圳路之生態性參數，探討石樑工最佳的配置。研究結果顯示，兩座石樑間距以 16 倍堆石直徑為宜，上游段石樑工以三角形向上延伸與渠槽橫斷面夾角為 45 度排列方式較佳，可得較小渠流能量損失和改善淤砂情況。在台中農田水利會苗栗卓蘭主圳施作生態改善工程，於水路設置改良式石樑工，進行圳路水理、底質、水質及生物等現地調查，印證水工試驗之結果。現地試驗結果顯示，圳路設置改良式石樑工可產生多樣性流況和增加水體溶氧量，有利於不同物種的生存；現地水質調查項目中，除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 值和濁度時有偏高外，均在灌溉用水可接受範圍內；生物調查於改善工程施作後記錄到極樂吻蝦虎 1 種，唯魚隻數量仍少，有待日後繼續調查。本研究結果有助於既有農水路生態工程之推展，並提供相關農政單位生態工程規劃與設計之參考。

關鍵詞：農水路，石樑工，生態工法，生態性參數。

ABSTRACT

Considered the structure and hydrology safely without destroy the existing structure, the stone-beam works is the application by the piled stones on the bottom of agriculture canal and the improvement of ecology. It can increase the diversity and the amount of dissolved oxygen in water. We have carried on the hydraulic test measured the water level, velocity of flow, energy losing, and silt and sand deposition. We also analyze the

*通訊作者，萬能科技大學營建科技系，320 桃園縣中壢市水尾里萬能路 1 號，shaoyang@msa.vnu.edu.tw

ecological parameter. The optimum project is selected for the stone-beam works in an irrigation canal. The improving engineering is made by using the stone-beam works in the Taizhong irrigation. The managements of hydraulic parameters and the investigations of water quality, channel-bottom constituent, and organism are made for estimating the benefits of improving engineering work. The result shows, it is good that the interval of roof beam of two stones piles the diameter of stone by 16 times; it is relatively good that one section of stones roof beam of the upper reaches extends 45 degrees of permutation ways upwards with the triangle. This can be smaller energy losing and improve the silt and sand situation. The in-situ investigation shows that the improving engineering can crease the diversity and the amount of dissolved oxygen in water. The water quality is except the content of ammonia nitrogen and turbid degree on the high side; the other investigated value of water quality can be accepted in the range of the agricultural water quality. In the investigation of fishes, shrimps, and crabs, we only caught one kind of fish as the *Rhinogobius giurinus* after the improving engineering work carried out. These research results contribute to the improvement of ecology in the irrigation canals and the reference of offering the relevant project to plan and design.

Keywords: Irrigation canal, Stone-beam works, Ecological engineering method, Ecological index.

一、前 言

灌溉排水系統係人類為生產糧食而開鑿之人工引水、輸水、貯水或排水設施，雖非自然水路，但其具有連接陸域與水域的機能，形成自然之生態廊道，亦能連接兩條天然河川，使成為區域的水路網。台灣過去重視農業的產量與收益，忽略了生態環境的維護，亦因工程師缺乏生態觀念，追求短期經濟效益而採用缺乏生態性的工程方法，如混凝土三面工排水路、沒有魚梯的攔河堰等。以上種種違反生態性之工程，使台灣經濟成長與生活環境形成強烈對比。現今圳路的材料和結構大都以混凝土內面工為基本設計，垂直化的護岸和光滑無孔隙的渠面，除塑造單調缺乏變化的流況，更使得生物難以生存其間。小時候在夏天的夜裡，田園裡到處都是螢火蟲，現已不復見，抓蜻蜓嬉戲的畫面，也已成爲過去的回憶。所幸政府已積極推動環保政策，農業部門亦提倡生活、生態及生產之「三生」農業，以改善農村之生活環境，正全面推動生態維護措施中。因

此，若能在受限的土地上，以不破壞原有水工結構設施，進行圳路改善工程，將有助於農水路成爲生態復育的大本營，達成兼具生態之構案。

一般灌排水路已大部份被施作成混凝土內面工，如拆除改建爲具有生態性的水路，改建工程曠日費時，且恐遭浪費公幣之議。因此，本研究擬在不破壞現有水工結構物，且考量結構和水理等安全下，探討灌溉排水矩形圳路生態改善之工程方法，期望塑造有利於生態性之水域環境，且不致造成圳路淤積和水位壅升。石樑工法爲在河道或圳路中以大型天然石材構築，於坡度較陡處可連續設置，形成階梯式淺瀨，使上游流速降低、沈降性增加，具有攔阻泥砂的特性。在低流量時，可保有一定水位；在高流量時，可形成保護魚類之避難所。基於上述，若將石樑工法應用於斷面均一的農水路，則能創造出良好的水域生態環境。期望透過此項改善工程，在縱坡平順、流況均一的圳路，增加流況變化和水體溶氧量，營造適合水生動植物的棲息環境，達到矩形農水路生態化之目的。

二、文獻探討

國內於 1980 年代起，進入環境綠美化的時代，倡行兼顧生態與環境美質之重要性，至 1990 年末期，逐漸推展水利生態理念。2001 年所舉辦的「新世紀國家公共建設會議」，強調 21 世紀應為建構營建自動化、綠建築、生態工法等公共建設綠色營建技術之體系。行政院公共工程委員會亦積極推動「生態工法」相關課題，其生態工法諮詢小組並於 2002 年發表國內對生態工法定義為「基於對生態系統的深切認知與落實生物多樣性保育及永續發展，而採取以生態為基礎、安全為導向的工程方法，以減少對自然環境造成傷害。」經由上述的施工法可知，在施作生態工法的遵循原則上，乃是以生態為基礎、安全為導向，並減少對自然環境所造成的傷害。故對於結構體，除在安全規劃設計外，尚需以表面粗糙化、高壩低矮化、坡度緩坡化、材質自然化及施工經濟化等為考量原則，並將生態保育概念、經濟層面及永續管理層面等納入設計中，找回人與自然環境間的互動互利。

前人在石樑工水工試驗方面，游繁結和黃政達(1996)進行固床工之渠槽試驗，由試驗數據分析得固床工有效高度/間距對中值粒徑、水深、平均流速及水力坡降等關係函數。黃宏斌和林雲暉(2002)藉由固床工試驗數據與其相關之參數，進行迴歸分析，求得固床工設置後渠槽之阻力係數，並利用此式推得固床工設置後所增加之阻力。林秉賢(2002)透過不同間距的橫向堆石群配置，觀察在不同流況和坡降條件下，直線與彎曲渠道中經水流作用床面泥沙後之幾何變化、流況歧異度、河床穩定性及水體再曝氣能力等影響，探討橫向堆石群與溪流棲地環境間之相關性。研究結果顯示，橫向堆石群的設置可有效增加試驗區的水深，使相對流速與福祿數減小，且在直線渠道間距配置為 2~4 倍相對河寬時，所產生的河床與水流型態最富變化。張耿偉(2003)透過順直與彎曲渠槽試驗，探討固床工設置前後河川棲地型態之異同。藉由設置不同型式和間距之固床工，以瞭解水體溶氧、河床穩定性及河川流況歧

異度等變化情形，做為判定固床工配置良窳之指標。其試驗結果顯示，在順直渠道中，鋸齒式固床工間距為 4 倍河寬間距時，水體溶氧增加率為最高，穩定床面之效果佳，棲地流況歧異度高，對於河川棲地之安全性和多樣性有正面之效應。洪勇善(2000)提出河床拋石和石樑工的改善工法，在渠道中擺設天然石材，以增加水流流況的歧異度，產生階梯式深潭和淺灘，使上游流速降低。在低流量時，可保有一定水位；在高流量時，可形成保護水生生物的棲所。郭昌樺(2002)經由試驗探討固床工設置前、後之泥砂運移情形，藉由不同保護範圍下之泥砂體積變化，瞭解固床工設置對河床穩定的效果。研究結果顯示，隨著固床工設置間距的減小，可以減緩河床的沖刷，若全區設置固床工，更具有穩定河床和降低沖刷率的效果。梁惟喬(2004)以銳緣改善、礫石坡面改善、礫石護坦改善及無改善等四種固床工之進行渠槽試驗，透過量測水流物理條件、泥砂輸出量及床面地形變化等，進行魚類通過分析、泥砂沖刷型態、棲地組成型態、河川自淨能力及水流功率等討論。試驗結果發現，無論在魚類通過分析、泥砂沖刷型態分析、棲地組成分析河川、自淨能力分析及水流功率等分析中，皆以礫石護坦為最佳，礫石坡面為次佳，而最差的設置為無改善固床工。

陳獻(2003)就農水路影響生態的因子列述七項：(1)封底：影響地下水的涵養和底棲生物的棲息環境；(2)混凝土化：阻斷水域與陸域生態連續空間；(3)護岸垂直化：模板澆製之垂直水路，表面光滑無孔隙，微生物難以附著，一般生物更是難以棲息；(4)水位變化大：一般灌溉水路，灌溉時期有水，而非灌溉時期則完全乾涸無水，此對水生生態系統影響甚大；(5)縱坡變化小：無法如天然河川或排水溝有淺灘、深潭等多變化的地形；(6)跌水工落差大：受地形限制所設置之跌水工，會影響魚群之上溯；(7)水路兩旁缺乏植栽：影響水體溫度的變化，無法提供水生生物遮蔭和食物來源。然而，鋼筋混凝土水路在輸水效率上有絕佳功能，而有其存在必要性，若能詳細考量水路的生態因子，使農水路結合生態工程，必然

是當今工法的主流，更是研究發展的新方向。故應用於農水路的生態工法，可著重在溝渠的壁面改善、圳路縱橫斷面構造改善及兩岸改善等三大方面(王桑村, 2001)，包含材料的變換、施工方式的改進等，以創造出多孔隙的空間，提供各類物種棲息、藏匿與覓食。陳明儀(2005)指出農用灌溉水路因受限用地、輸水功能及效率等限制，而無法全面適用生態工法，若能從既有農用水路生態棲地條件之改善，利用生態材料和工法施工，並配合河川和生態環境之規劃，應是未來台灣地區農用水路結合生態工法發展之可行方向。

近年來，德國及日本等已有許多工程案例，以河床拋石、石樑工、固床工及砌石護岸等工法，增加河川流況之歧異度，以達到穩定河床等功能，營造出深潭、淺灘等水域環境，提供魚類避難之場所。在野溪整治或農地重劃水路改善時，也漸次導入生態保育的觀念。雖然，野溪整治和農水路有所不同，但其生態保育工法卻是相通的，皆是營造多樣化水域、多孔質空間及豐富植生，以提供給不同物種棲息的環境。國內相關的生態工法案例，如彰化縣田尾園藝特定農業農地重劃工程、新竹縣新埔鎮照門地區農村綜合發展計畫、宜蘭縣武荖坑風景區規劃工程等。由此可見，生態工法在政府的倡導下，已成為工程施工規劃的主流，在配合其他的景觀設計下，形成民衆遊憩休閒的處所，達到潛移默化的生態教育功能。國內生態工法雖然仍處於萌芽階段，但各界在工程建設安全、生態環境保育、增進民衆親水空間及提高生活品質等推展上，均不遺餘力，已有初步的工程成果。

混凝土圳路雖然擁有良好的輸水功能，卻易使原本存在的生態環境消失殆盡。因此，誘導原生物種重新回到此區域，常成為整治案例之規劃重點。在國外相關案例中，如德國伊薩河水路依不同氣候區域訂定整治計畫，在上游中海拔森林區，以維持林地與牧地的傳統使用為保育目標；中游慕尼黑黑河段，以河床穩定和水域復育為目標；中游慕斯堡東部河段，以河岸重建和環境棲地保育為目標。主要工法有魚道及水路生態廊

道、水工結構改善、多樣性棲地、流域管理等方法，考量整個流域系統，進行整治復育計畫(全國生態工程入口網)。在日本農村地區的農村整備事業上，亦以農水路生態再造為考量，採用近自然工法，做為魚類或螢火蟲等環境指標生物的保育工作。在考量水里、生態及水質淨化等條件下，配置漿砌卵石或 V 型漿砌卵石固床工，對於河川棲地之水質淨化和多樣性可提供正面的效應。日本北海道新得町佐幌地區為改善灌溉水路之生態特性，以 PVC 管理入圳路兩側護岸，做為螃蟹棲息、躲藏的空間，營造水路的生態環境(日本農村水產省農村振興局, 2004)。宜蘭農田水利會所屬柯林湧泉圳更新改善工程規劃時，調查發現圳中有黃鱔、鮭魚、白鰻、鱸鰻、七星鱧、斑鱧等適合底棲魚類，偏好在草叢間或石縫洞穴中棲息。因此，在施作渠岸基腳時，每隔 1.5 m 埋設香蕉莖 1 處，香蕉莖腐爛後所產生的孔洞，提供上述魚類或蝦、螃蟹等生物棲息(蔡逸文等, 2005)。此方法以生態材料取代 PVC 管製作渠岸基腳孔洞，在施工方便性和生態性等均較佳，值得工程單位採用推廣。

三、水工試驗及數據分析

為了驗證石樑工應用在農水路生態改善的可行性，本研究進行系列的水工試驗，以蒐集工程設計與施工所需之水理參數。本試驗在渠槽底部設置橫向石樑工，於一般圳路設計坡度與流速下，模擬水路高水位時流況的變化。針對不同石樑間距和排列方式，分析渠道設置石樑工後之水位變化和渠流能量損失，並探討兩座石樑間的淤積情況，進行圳路流速分佈、生態棲地面積及水體溶氧量等生態性指標分析，評選石樑工最佳之配置方案。

3.1 水工試驗設計

3.1.1 尺度分析

本試驗模擬中、大型灌排水圳路為主要考量，選用實際農水路渠寬為 300 cm。又試驗水槽渠寬 40 cm，依據幾何相似，模型(m)與實際(p)渠寬之長度比 $\lambda = 1/7.5$ 。本試驗以重力和慣性力

影響最大，有關之動力相似性為福祿數一致，亦即 $(N_F)_m = (N_F)_p$ 。故依據福祿數(Froude number; N_F)相等，求得速度比 $\lambda_v = 1/\sqrt{7.5}$ 。

3.1.2 試驗佈置及試驗設計

利用萬能科技大學營科系流體力學實驗室之中型試驗水槽，試驗水槽尺寸 12 m 長、0.4 m 寬及 0.6 m 高，進行水工試驗。試驗水位變化之量測，使用架設於水槽上方之移動式電子針尺，量測精確度可達 0.01 mm。流量量測則採用日本製電子式流速儀，廠牌：KENEK、型號：LP 1300WN。本試驗水槽經過流量率定得馬達電壓係數 FEQ 與流量 Q (cms) 之關係式為 $Q = 0.0018 FEQ - 0.0134$ (洪偉哲，2006)，試驗時以此式估算試驗流量。

為探討何種石樑工排列型式較能達到預期成果，試驗時設置連續兩座石樑，下游處石樑固定為橫向緊密排列的堆置方式，而上游處的石樑則由原本的橫向緊密排列，改變為從渠底兩側分別向上游延伸，與渠槽橫斷面夾角為 30 度和 45 度等三角形排列，且堆石以間隔方式堆置，讓流經上游石樑工的水流形成束流，以期減少兩座石樑間發生淤積之情形。選用試驗流量 $Q = 0.0442$ cms、渠坡 $S = 1/500$ ，又現地試驗改良式石樑工採用直徑 30 ~ 40 cm 堆石，由尺度分析得，試驗堆石直徑(D)選用 5 cm，兩座石樑間距分別為 8 倍、16 倍及 24 倍堆石直徑，石樑工試驗佈置如圖 1 所示。進行石樑工配置水工試驗，藉由量測水槽縱向中斷面的水位變化，探討石樑工最佳之配置方案。

3.1.3 淤砂量測

石樑工法乃在渠道中橫向堆置石塊或混凝土樑，其目的在降低渠道坡度、減緩水流速度，達到穩定渠床的功能。此設施易造成輸水效率降低和泥砂淤積，對以輸水效率為主要考量的農水路有不利的影響。因此，本研究改變傳統石樑堆石橫向緊密排列方式，以三角形向上游延伸排列，期望達到渠流束流攻砂的特性，減少兩座石樑間淤砂的情形。

本試驗採用流量 $Q = 0.0245$ cms、渠坡 $S = 1/500$ 之流況，佈置 5 cm 堆石直徑、16 D 石樑間

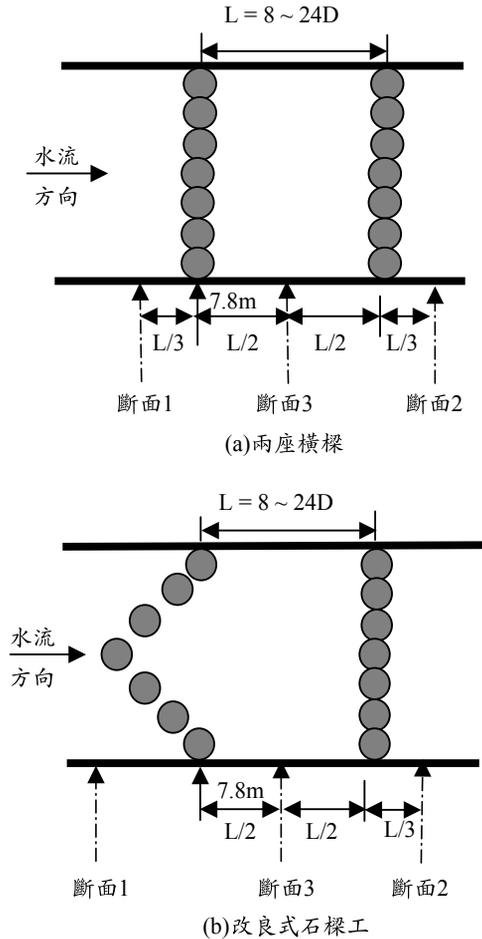


圖 1 石樑工試驗佈置示意圖

距，以及三角形向上游延伸 0 度、30 度及 45 度等三種堆石排列，進行石樑工渠道之淤砂試驗。試驗選用#30 之標準砂，經篩分析得 $d_{16} = 0.661$ mm、 $d_{50} = 0.875$ mm 及 $d_{84} = 1.089$ mm。粒徑分佈參數 $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.28$ ，根據周憲德等(2002)指出 σ_g 小於或等於 1.3 時可視為均勻砂，本試驗用標準砂 σ_g 值小於 1.3，故可視為均勻砂。又依 Neill (1968) 均勻底床啟動速度 $V_c = 1.41\sqrt{(s-1)gd_{50}(h/d_{50})^{1/6}}$ ，其中， s 為底床質比重， g 為重力加速度， d_{50} 為中值粒徑， h 為水深。本試驗條件下經計算得 $V_c = 0.386$ m/s，試驗平均流速 $V = 0.438$ m/s，故 $V > V_c$ 可視為濁水沖刷(周憲德等，2002)，可觀察石樑工底床淤砂的情況。試驗時，於第一座石樑上游 50 cm 處至

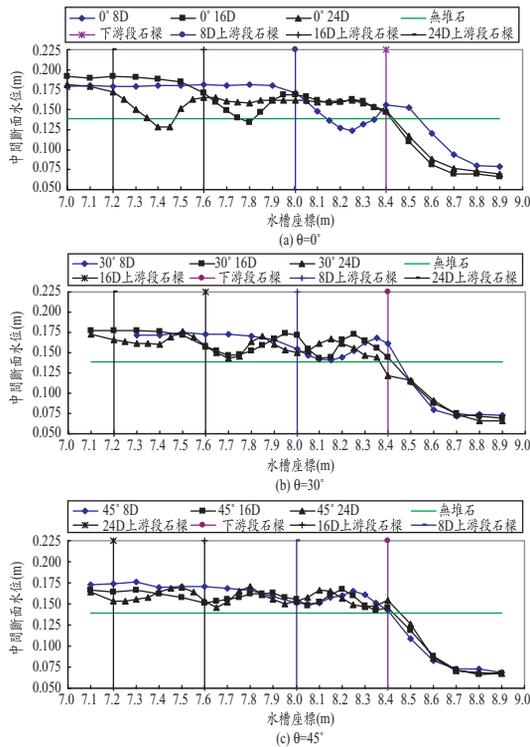


圖 2 石樑工延伸角度與縱斷面水位之變化

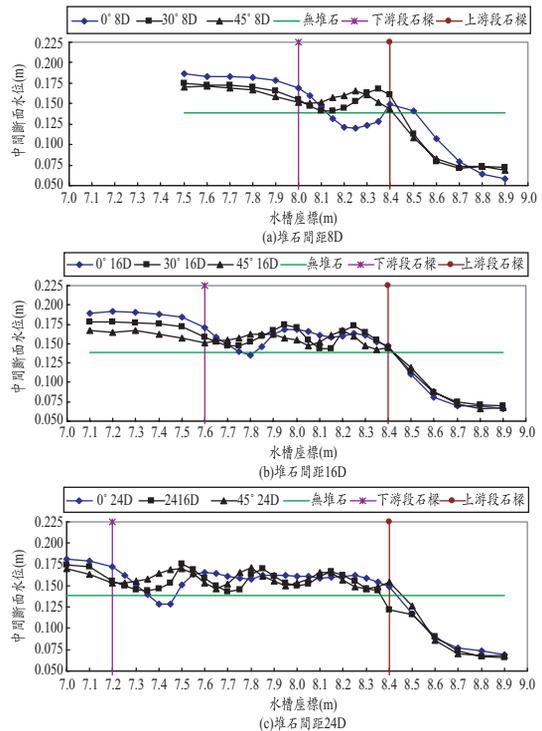


圖 3 石樑工石樑間距與縱斷面水位之變化

第二座石樑間試驗區，均勻平整鋪置 4 公斤#30 標準砂，經水流冲刷至渠床呈現穩定狀態為止(試驗時間約為 30 分鐘)，記錄渠道試驗段內淤砂分佈之情形，並量測試驗區內的淤砂量。

3.2 水工試驗數據分析

3.2.1 水位變化分析

渠底設置石樑工於高流量、高水位時，水位壅高情形與護岸兩側的安全有著極大之關係。堆置石樑工後，若水位高於原設計之出水高度，則此改善工法需加高護岸，以增加圳路輸水面積；但若堆置石樑工後，其水位壅升情形不致影響原圳路之安全性，則更突顯出此改善工法之實用性。一般而言，在相同流量時，水深愈大，相對應斷面流速愈小。本研究量測渠道縱向中斷面的水深變化，藉由水深估算斷面之平均流速，且可推估渠道淤砂之情況。

於渠底連續堆置兩座石樑，其堆石方式若皆為橫向緊密排列，固然對於生態性有較佳的效

果，然尚需考慮圳路之輸水效率和淤積情形，故改變上游段石樑以三角形向上游延伸排列，堆石延伸角度和石樑間距與渠道縱斷面水位之變化分別如圖 2 和圖 3 所示。在平直矩形渠道堆置石樑，上游段水位因受堆石阻礙的影響，由圖 2 和圖 3 均顯示，不論石樑間距和堆石排列方式水位皆呈現壅升現象。由圖 3 渠道縱斷面水位變化可知，兩座石樑間距為 8D 時，由於兩座石樑距離過於接近，水流束流作用尚未發展完全時，就越過下游段的石樑工，而散失水流攻砂之效益；兩座石樑間距為 16D 時，水流可淘洗起兩座石樑間的淤砂，往下游帶離，此石樑間距具較佳的攻砂效果；兩座石樑間距為 24D 時，水位線於通過上游段石樑後水位下降，而後回復漸趨平緩，惟距離太遠，對於水流束流攻砂之效果不大。由以上分析推論得，16D 間距改良式 45° 石樑工可獲得較佳減淤之效果。

爲了量化分析渠道水位變化，以水位差平方和爲分析指標，定義爲石樑工試驗段縱向中斷面

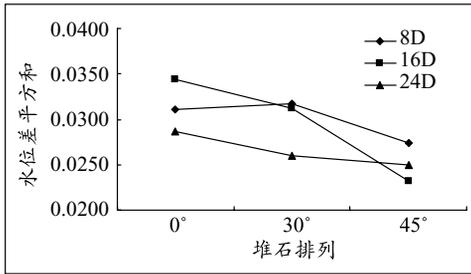


圖 4 石樑工配置與水位差平方和之關係

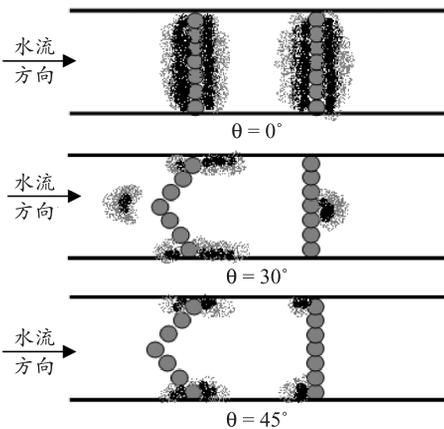


圖 5 16D 間距改良式石樑工渠底淤砂之分佈

各量測點水位與渠道空白試驗平均水位之差，再將各差值平方後相加得之。水位差平方和可做為渠道水位變化的分析指標，其值越大表示水位變化的程度越大，渠流流況多樣性也越佳。本渠道空白試驗之平均水位為 0.1397 m，石樑工試驗數據水位差平方和分析如圖 4 所示。於相同石樑間距下，水位差平方和以兩座橫樑石樑工為最大，改良式 30°石樑工次之，改良式 45°石樑工為最小。且以 16D 間距 0°石樑工水位變化為最大，最具流況多樣性的特性，8D 間距改良式 30°石樑工、8D 間距 0°石樑工及 16D 間距改良式 30°石樑工次之。

3.2.2 渠流能量損失估算

量測斷面 1 (上游段)和斷面 2 (下游段)之水深(h)，藉由已知流量和量測水深推估斷面 1 和斷面 2 之平均流速，估算試驗段之渠流能量損失率，其定義為 $h_f = [(h_1 + V_1^2 / 2g) - (h_2 + V_2^2 / 2g) + SL] / (h_1 + V_1^2 / 2g + SL) \times 100\%$ 。其中， S

表 1 石樑工渠流能量損失率

堆石直徑 (D)	石樑間距	兩座橫樑	一座橫樑 + 一座 30 度	一座橫樑 + 一座 45 度
5 cm	8D	7.340	11.018	8.694
	16D	18.282	10.182	1.690
	24D	12.617	14.565	5.299

註：單位(%)

表 2 石樑工之淤砂量比較

堆石直徑 (D)	石樑間距	兩座橫樑	一座橫樑 + 一座 30 度	一座橫樑 + 一座 45 度
5 cm	8D	444.68	270.72	219.52
	16D	361.88	116.07	92.70
	24D	440.23	345.05	148.26

註：單位(公克)

為渠道坡度， L 為斷面 1 與斷面 2 之間的距離(2 m)，石樑工渠流能量損失率統計如表 1。渠流能量損失率以 16D 間距改良式 45°石樑工為最小，24D 間距改良式 45°石樑工次之，以 16D 間距 0°石樑工為最大。由此試驗結果得知，16D 間距改良式 45°石樑工可獲得最小的渠流能量損失，為石樑工較佳之配置方案。

3.2.3 淤砂試驗分析

本研究試驗數據分析以渠道縱向水深推估斷面流速分佈，並進而推論渠道可能的淤砂情形。一般而言，水流速度越低時，易形成渠底淤積之情形，而高流速時，易產生冲刷之流況。為驗證渠道水深與淤砂之關係，進行動床淤砂試驗。

石樑工動床淤砂試驗數據統計如表 2。於相同石樑間距下，試驗區淤砂量均呈現兩座橫樑石樑工為最大，改良式 30°石樑工次之，改良式 45°石樑工為最小。於相同堆石排列時，以 16D 間距石樑工淤砂量為最小。就減少渠道淤砂的效率而言，以連續橫向緊密排列石樑工為最差，改良式 30°石樑工次之，改良式 45°石樑工為最佳，且以 16D 間距改良式 45°石樑工之束流減淤效果為最佳，與水位數據分析所推論結果相符，驗證了水深推估渠道淤砂的論點。在 16D 石樑間距時，不同堆石排列方式所產生渠道淤砂分佈如圖 5 所

示，改良式石樑工於第一座與第二座石樑間試驗區域內僅渠道兩側有少許之淤砂，此顯示水流呈現中間流速較大而兩側較緩之流況，渠流確實具有束流之特性。而連續橫向緊密排列石樑工在石樑前後均有大量淤砂，且石樑後方淤砂量多於前方，此淤積情況將影響農水路之輸水效率和水理安全。由以上分析結果可驗證，本研究改良式石樑工可有效改善傳統石樑工淤砂之缺點。

3.3 生態性指標分析

3.3.1 流況歧異度研討

水流流經石樑工堆石段，原本均勻分佈之流況，因受渠底堆置石樑的影響，產生低速流和高速流等區域，多樣性的流況變化，因而提供各類生物適合生存之水域環境。為了解渠道之流速分佈，將渠流斷面橫向等間距分為 6 等分，以流速儀量測 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 及 0.9 倍水深處流速，繪製渠流橫斷面等流速線剖面圖，以探討渠流之流速分佈。

在生物的系統中，存在著不同或不相似的特性個體，稱之為歧異的個體，其歧異的程度稱為歧異度（施漢鵬，2004）。本研究為瞭解不同型式石樑工所塑造出之棲地型態，以辛普森歧異度指標(Simpson's diversity index)做為流況多樣性分析指標， $D = 1 - \lambda$ ， $\lambda = \sum_{i=1}^n p_i^2$ ，式中， D 為歧異度， P_i 為第 i 種流況所佔的棲地面積百分比， n 為流況數， λ 為均勻度。 λ 值介於 0 至 1 之間，可視為一種優勢度指數(dominance index)或均勻度，強調優勢集中之程度，其值愈大表示棲地較單一化。棲地歧異度越大 (D 值愈大)，即棲地越多樣化，能提供更多物種之棲息空間。流量 $Q = 0.0442$ cms 下，不同石樑間距和堆石排列方式石樑工渠道斷面 3 的流速分佈如圖 5，流速分佈面積百分比和歧異度分析列於表 3。石樑工流況歧異度分析得知，8D 間距改良式 45°石樑工歧異度為最大，16D 間距 0°石樑工歧異度次之，24D 間距改良式 45°石樑工歧異度為最小。由此分析結果可知，8D 間距改良式 45°石樑工可獲得最大歧異度之流速分佈，為流況多樣性較佳之石樑工配置。

表 3 石樑工之生態棲地面積百分比及歧異度

石樑間距	流速 (m/s)	流速面積百分比(%)		
		0°	30°	45°
8D	0.0 ~ 0.2	8.87	9.82	10.54
	0.2 ~ 0.4	9.27	9.79	10.31
	0.4 ~ 0.6	8.24	9.69	11.11
	0.6 ~ 0.8	8.60	24.61	44.41
	0.8 ~ 1.0	12.12	44.63	12.32
	> 1.0	52.89	1.45	11.32
	0.0 ~ 0.4 (生態棲地)	18.14	19.61	20.85
歧異度	0.6749	0.7114	0.7407	
16D	0.0 ~ 0.2	11.91	14.50	11.37
	0.2 ~ 0.4	11.72	11.97	11.19
	0.4 ~ 0.6	14.20	13.06	11.96
	0.6 ~ 0.8	44.56	56.17	47.84
	0.8 ~ 1.0	17.60	4.30	17.64
	> 1.0	0.00	0.00	0.00
	0.0 ~ 0.4 (生態棲地)	23.63	26.47	22.56
歧異度	0.7224	0.6302	0.7003	
24D	0.0 ~ 0.2	10.54	12.10	12.09
	0.2 ~ 0.4	10.61	11.98	12.01
	0.4 ~ 0.6	13.13	13.92	14.55
	0.6 ~ 0.8	47.85	49.72	60.25
	0.8 ~ 1.0	17.87	12.28	1.10
	> 1.0	0.00	0.00	0.00
	0.0 ~ 0.4 (生態棲地)	21.15	24.08	24.10
歧異度	0.6995	0.6893	0.5867	

3.3.2 生態棲地面積計算

葉明峰等(2000)文獻指出，較弱小的台灣鱗頰魚在進行巡航泳速測試時，在流速超過 1.2 m/sec 情況下，很難游泳超過 30 分鐘。又葉明峰等(2000)研究結果發現，鯉科和鰕虎科等魚種最適流速分別為 0.2 m/sec 和 0.3 m/sec，且當流速超過 1.2 m/sec 時，其適合度均降為零。由以上論述，假設流速低於 1.2 m/sec 區域為生態理想之水理棲地。經尺度分析得，試驗流速為 $1/\sqrt{7.5}$ 倍現地流速，因此，選取 0.0 ~ 0.4 m/sec 流速之累積面積做為生態棲地面積。

依圖 6 流速分佈計算各流速所佔面積百分比，分析得石樑工之棲地面積百分比如表 3。於相同石樑間距下，除 16 間距石樑工外，生態棲地面積百分比以改良式 45°石樑工為最大，改良

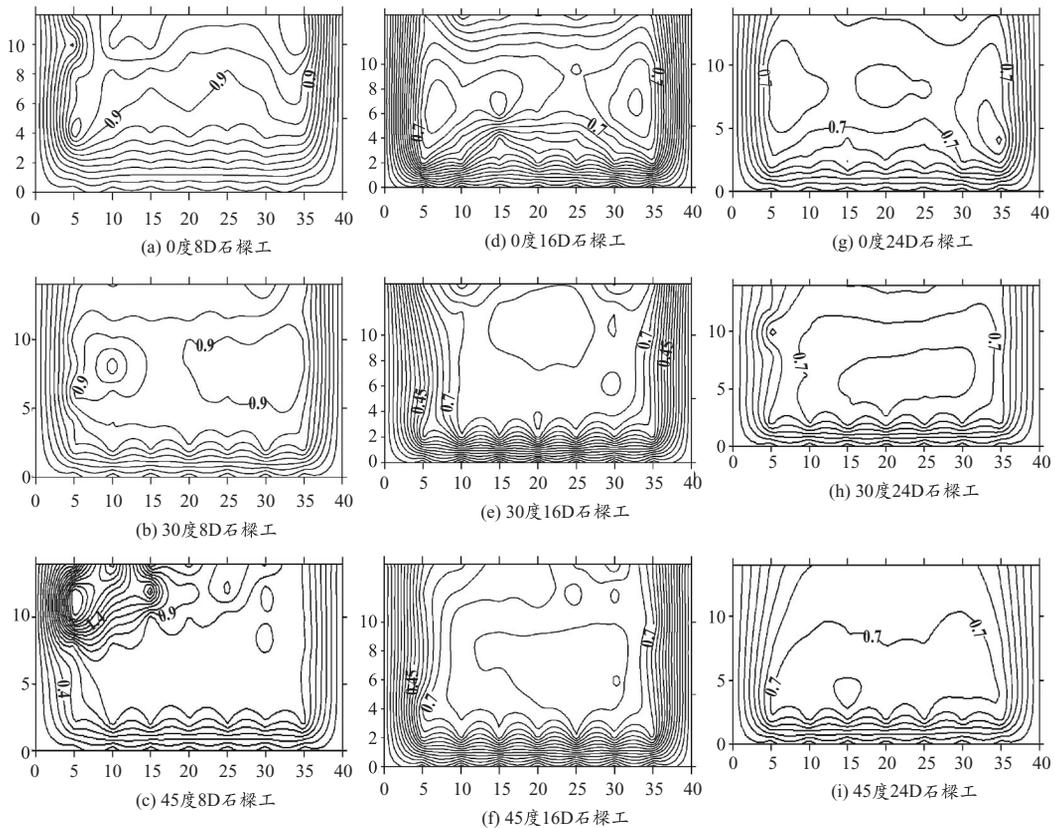


圖 6 不同堆石排列和石樑間距石樑工之流速分佈

式 30°石樑工次之，兩座橫樑石樑工為最小。於相同堆石排列時，改良式 45°石樑工生態棲地面積百分比隨著石樑間距的增大而增加，兩座橫樑石樑工和改良式 30°石樑工生態棲地面積百分比，以 16D 間距石樑工為最大，24D 間距石樑工次之，8D 間距石樑工為最小。綜合以上分析結果得知，16D 間距改良式 30°石樑工可獲得最大的生態棲地面積百分比，為較佳之石樑工佈置。

3.3.3 溶氧量數據分析

自然水體中溶氧量(Dissolved Oxygen; DO)多寡係污染程度的一個重要參數，通常水生生物要求的生存環境其溶氧量至少在 4.0 ~ 5.0 mg/L 以上。溶氧量愈少的水體，水生生物種類將日益減少，故溶氧量的檢測為水質檢測重要項目之一。本研究使用美國 Thermo 公司製 Orion Star 系列之水質測定儀量測水體溶氧量，將儀器直接

置於試驗水流中斷面中層(1/2 倍水深處)，量測渠流之水體溶氧量。

實驗量測水體溶氧量分別於上游石樑前方(斷面 1)、兩座石樑中間(斷面 3)及下游石樑後方(斷面 2)等三處(如圖 1 所示)，上游石樑前方處溶氧量代表渠流未流經石樑工之水體溶氧量，做為對照流經石樑工後水體溶氧量。實驗時水流溫度將影響水體溶氧量之大小，本實驗分階段完成，實驗水溫 27.0 ~ 31.2°C，相差 4.2°C，對應水體溶氧量將有所影響，故採溶氧量增加率做為相互比較之依據，溶氧量增加率(%)定義為[(斷面 2 或斷面 3 之最大溶氧量)-(斷面 1 溶氧量)] / (斷面 1 溶氧量) × 100%。表 4 顯示各種間距和排列石樑工的水體溶氧量，其值在 7.24 至 7.86 之間。由表可知，渠流流經石樑工後水體溶氧量均有增加，溶氧量增加率為 2.21 ~ 4.67%，此顯示石樑工可

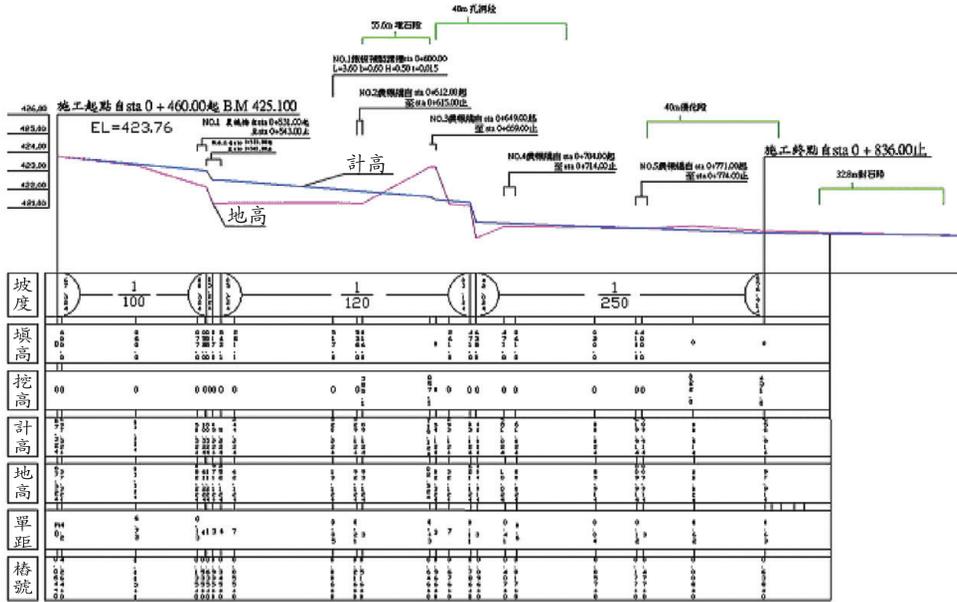


圖 7 現地試驗圳路位置及剖面圖

表 4 不同間距和排列方式石樑工之水體溶氧量

石樑工 型式	水體溶氧量(mg/L)				
	斷面 1	斷面 3	斷面 2	溶氧量 增加率(%)	水溫 (°C)
0度 8D	7.49	7.84	7.78	4.67	27.0
0度 16D	7.69	7.86	7.73	2.21	27.0
0度 24D	7.24	7.34	7.57	4.56	31.2
30度 8D	7.53	7.57	7.80	3.59	29.7
30度 16D	7.49	7.56	7.76	3.60	29.8
30度 24D	7.45	7.57	7.68	3.09	29.6
45度 8D	7.39	7.59	7.71	4.33	28.6
45度 16D	7.60	7.67	7.78	2.37	28.6
45度 24D	7.53	7.57	7.80	3.59	28.5

提高渠流之水體溶氧量，提升水域環境之生態性。水體溶氧量增加率統計得，以 8D 間距 0°石

樑工為最大，24D 間距 0°石樑工次之，8D 間距改良式 45°石樑工再次之，而 16D 間距 0°石樑工和 16D 間距改良式 45°石樑工等水體溶氧量增加率較低。溶氧量增加率愈大，表示渠流再曝氣能力愈強，可獲較佳的水域生態性環境。

四、改良式石樑工現地試驗

4.1 現地試驗水路設計及施作

本試驗場址選定於苗栗縣卓蘭鎮鄰近大安溪之卓蘭主圳路，屬台中水利會卓蘭工作站之灌區，圳路為三內面工混凝土矩形渠道，施工現地試驗渠段圳路位置如圖 7 所示。選取圳路平直段 82.1 m 做為現地試驗水路，佈置六座改良式石樑工，施作長度為 55.61 m，選用近似圓形石塊，

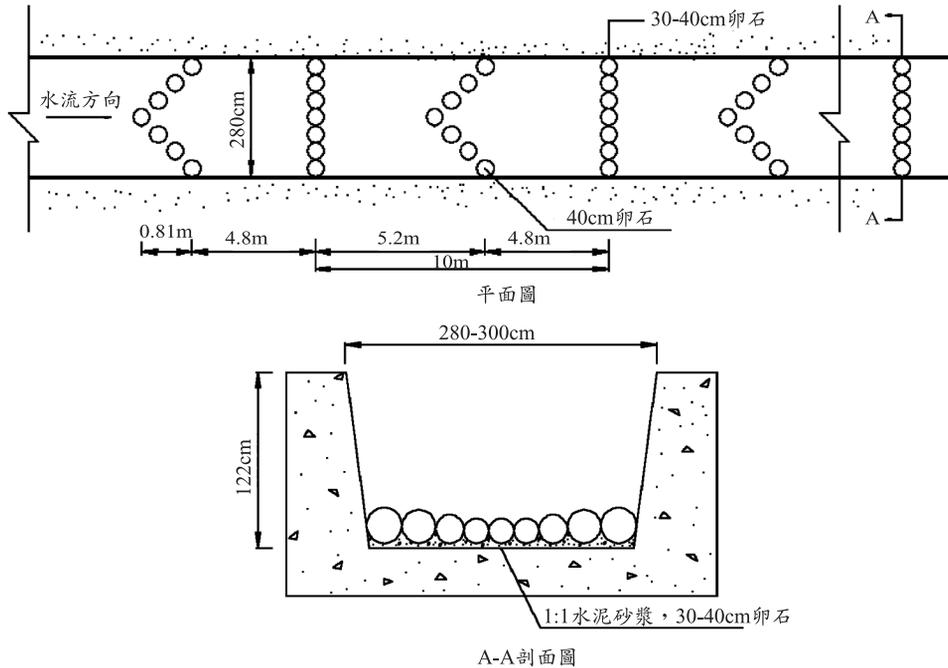


圖 8 改良式石樑工圳路改善工程配置示意圖

堆石粒徑 $D = 0.3 \sim 0.4 \text{ m}$ ，堆石間距 $L = 16D = 4.80 \text{ m}$ ，而改良式石樑工堆石延伸角度 $\theta = 30^\circ$ ，圳路改善工程配置示意如圖 8 所示。施作時，將原圳路底部混凝土面打毛，並於擺置堆石前清洗乾淨，灌漿前先以純水泥漿塗佈，以利新舊混凝土面之結合，石塊底部基座以 1:1 水泥砂漿澆灌。

4.2 現地調查

4.2.1 水理調查

水理環境的調查因子分別為水路斷面寬度、流速、水深、流量及渠坡等。本研究以日本三映測量器株式會社製 NO.1175 型電子式流速儀量測流速，將流速儀置於圳路中斷面 0.6 倍水深處，記錄流速儀 30 秒的響數，代入本儀器流速公式 $V = 0.127 \times (10N) / t + 0.009$ ，計算水流之流速。其中， N 為響數， t 為試驗時間。每斷面測點重複量測兩次，使其差在容許誤差範圍內，取兩次流速之平均值，做為該斷面之平均流速。如兩次量測差在容許誤差範圍外，則重新施測，直至在容許誤差內。

渠流能量損失大小將直接影響圳路之輸水效率，間接影響圳路之水位高低。選定試驗段內上、下游兩處，分別量測圳路中斷面的水位和流速(以一點法量測圳路中斷面 0.6 倍水深處流速)，計算流過試驗段渠流能量損失率，其定義為 $h_f = [(h_1 + V_1^2 / 2g) - (h_2 + V_2^2 / 2g) + SL] / (h_1 + V_1^2 / 2g + SL) \times 100\%$ 。其中， h_1 和 V_1 分別為上游段斷面之水深和平均流速， h_2 和 V_2 分別為下游段斷面之水深和平均流速， S 為試驗段渠床坡度， L 為上游與下游測點之距離。

4.2.2 底質量測

底質環境為許多水生生物賴以生存的基質，因此，其組成結構與水路生物群聚有非常密切的關係。灌排水路底質調查以表面目視法調查水路底質的結構，輔以腳踏法進行，記錄樣區底石種類與組成比例。自試驗段採集圳路底質樣本約 1200 g，進行土樣篩分析試驗，將樣本通過 3/4 in、3/8 in、#4、#8、#10、#16、#30、#50、#100 及 #200 等 10 個標準篩，量測遺留骨材重(g)，計算樣本遺留百分比(%)、累積遺留百分比(%)、通過百分比(%)及細度模數。最後，將各量測數據列表，繪

表 5 卓蘭主圳路現地試驗段渠道斷面資料

試驗項目	樁名	里程	渠寬 (m)		渠高 (m)
			上斷面	下斷面	
石樑工		0 + 000		3.10	1.08
	起點	010	3.07	3.07	1.08
		015	3.05	3.05	
		020			
		030			
	控制點	040	3.08	3.08	1.04
		050			
	終點	060	3.06	3.06	1.08
		070	3.05	3.05	
		080	3.10	3.10	
		0 + 082			1.08

製土樣之粒徑分佈曲線，求得 D_{10} 、 D_{30} 及 D_{60} 等粒徑分佈資料。其中， D_{10} 、 D_{30} 及 D_{60} 分別代表通過 10%、30% 及 60% 時之土壤粒徑。

4.2.3 水質調查

利用萬能科技大學營科系攜帶式水質監測儀(Orin Star Sever Meter)、濁度測定儀(Thermo Orin AQ4500)及化學需氧量測定儀(Advanced Portable Model AQ4000)等儀器量測水質。在試驗段上、中及下游等處量測水體之溫度(T)、酸鹼度(pH)、濁度(NTU)、溶氧量(DO)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、導電度(EC)及化學需氧量(COD)等資料。

4.2.4 生物調查

在選定試驗圳路，分為上游段、試驗段及下游段等三區段，每一樣區為 20 m，進行生物調查。水域生態調查採網具、籠具等方式同時進行實地調查，並以訪問方式做為輔助，調查方式簡述如下：

卓蘭主圳之圳路寬度僅約為 3.0 m，故設置定置魚網進行調查採集。定置魚網設置約 3 小時後收起，並記錄其內之魚蝦蟹種類和數量。但因網目大小使得可採集之魚蝦數量和體型有所限制，且部份圳路內草本植物叢生，故使用手撈網進行輔助調查。以蝦籠和魚籠進行不定點之調查。魚籠和蝦籠內置餌料，投入水中並加以固定，放置隔夜後取出，並記錄其內之魚蝦蟹種類和數量。藉由與當地居民閒談或訪談，以了解當

表 6 卓蘭主圳路現地試驗水理量測統計表

試驗日期	樁名	水深 (m)	流速 (m/sec)	流量 (cms)	坡度 S
95/01/25	起點	0.440	0.803	1.095	5.1E-03
	控制點	0.400	1.343	1.654	
	終點	0.390	1.279	1.526	
	對照段	0.370	1.544	1.399	
95/03/21	起點	0.410	0.983	1.237	
	控制點	0.370	1.237	1.409	
	終點	0.350	1.491	1.597	
	對照段	0.265	1.829	1.188	

表 7 卓蘭主圳路現地試驗渠流能量損失率

試驗段	h_1 (m)	V_1 (m/s)	h_2 (m)	V_2 (m/s)	渠流能量損失率 (%)	單座石樑工損失率 (%)
石樑工	0.56	0.39	0.50	0.94	40.612	6.769

註： $S = 0.005$ ， $L = 70$ m

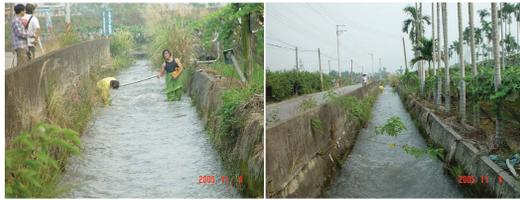
地環境之變遷，以及圳路水域環境之改變，獲取水路生態基本背景資料。

4.3 現地試驗數據分析與結果討論

4.3.1 水理調查數據分析

卓蘭主圳路現地試驗場址分別於 95 年 1 月 25 日和 3 月 21 日等進行 2 次水理調查，圳路斷面調查資料和水理量測資料如表 5 和表 6，試驗段量測位置為起點(里程 0 + 010)、控制點(里程 0 + 040)及終點(里程 0 + 060)，對照段量測位置為此段水路之中間點。改良式石樑工段圳路水深約為 0.4 m，平均流速約為 1.3 m/sec，流量約為 1.4 cms，而對照段圳路流速均較改良式石樑工段高出許多，此顯示改良式石樑工能有效降低圳路水流速度。現地生態改善施工前、中及後圳路現況如圖 9~圖 11，由現地觀察發現，改良式石樑工段渠流流況較對照段具有明顯變化，顯現多樣性的流況。

量測改良式石樑工試驗段上游段和下游段等兩斷面之水深(h)和流速(V)，估算試驗段渠流能量損失率。現地調查渠流能量損失率結果如表 7 所示，結果顯示全段 70 m 長渠流能量損失



(a) 試驗段 (b) 對照段
圖 9 現地生態改善工程圳路施工前現況



(a) 改良式石樑工 (b) 對照段
圖 10 現地生態改善工程圳路施工中現況

率為 40.612%，此為水流流經 6 座改良式石樑工之總渠流能量損失率，故每座改良式石樑工之渠流能量損失率為 6.769 %，此結果與水工試驗值 10.182 % 相近(試驗數值列於表 1)，相較水工試驗值為低，應為現地試驗圳路流速較水工試驗流速小，故渠流能量損失率相對較小。

4.3.2 底質調查數據分析

本圳路為混凝土三面工，現地觀察改良式石樑工試驗水路淤砂量非常低，僅在石樑外緣處有些微細砂淤積，其餘部份幾乎沒有泥砂存在，而對照段渠底完全沒有泥砂淤積。故無法採得土樣，因而未進行土樣篩分析試驗。

4.3.3 水質調查數據分析

本研究於現地試驗圳路施工前、後共進行 5 次水質調查，數據統計如表 8，水質調查成果分析如下：

1. 根據調查結果得知，溶氧量(DO)在 7.11 ~ 8.80 mg/L 之間，高於台灣省灌溉用水水質標準規定 DO 下限 2.0 mg/L，比水生生物要求的生存環境之溶氧量要高。溶氧調查資料顯示，石樑工圳路水體溶氧量自上游向下游漸次增大，石樑工試驗段溶氧量均高於對照段，顯示石樑工確實能提高圳路水體之溶氧量。



(a) 改良式石樑工(1) (b) 改良式石樑工(2)



(c) 改良式石樑工(3) (d) 對照段

圖 11 現地生態改善工程圳路施工後現況

2. 圳路水流酸鹼值(pH)約在 8.03 ~ 8.47 之間，呈微鹼性水質，適用於農業灌溉用水水質。
3. 於民國 95 年 5 月 24 日測得水體濁度值高達 926 NTU，此因接連豪雨的緣故，導致圳路水流濁度值大幅提高，而遠遠超出飲用水標準。其餘濁度值亦均超出飲用水標準值 4 NTU。
4. 水體電導度在 194 ~ 329 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 之間，於民國 95 年 3 月 21 日測得電導度值 329 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 為最高，表示水體鹽類濃度高，較不適宜農田灌溉用水。
5. 氨氮含量($\text{NH}_3\text{-N}$)結果均大於飲用水標準值，除 95 年 3 月 21 日的含量值低於灌溉水質標準外，其餘皆超過標準值。可能原因係試驗圳路有許多葡萄、楊桃、水梨等果園，果農在上游施放肥料、棄置腐壞水果及樹葉殘體等所致。
6. 3 次現地水質調查 COD 分別為 129.0、215.7 及 200.1 mg/L，其值均高於飲用水標準，尚在農田灌溉用水可接受水質範圍內。

4.3.4 生物調查數據分析

本研究水域生物調查自 94 年 10 月至 95 年 8 月止，每月調查 1 次，共計進行 11 次調查，涵蓋施工前、中及後等各時期，水域生物調查結果如表 9 所示。卓蘭主圳路之魚類調查目前僅記錄

表 8 卓蘭主圳路現地試驗水質調查數據

調查日期	測點	環境項目		水質調查項目						
		溫度 (°C)	天氣	水溫 (°C)	溶氧量 (mg/L)	酸鹼值 (pH)	濁度 (NTU)	導電度 (µs/cm)	氨氮含量 (mg/L)	COD (mg/L)
飲用水標準							4.00		0.100	25.0
灌溉水質標準					2.00				1.000	
95/1/25	起點	20	晴	19	8.20#					
	控制點				8.40#	8.43	16.56	231	2.100	
	終點				8.30#					
	對照段				8.00#	8.42				
95/3/21	起點	21	陰	19	8.70#					
	控制點				8.80#	8.42	44.29	329	0.766#	
	終點				8.79#					
	對照段				8.75#	8.47		320	0.956#	
95/5/24	起點	23	雨	23	8.60#					
	控制點				8.65#	8.13	926	259	4.530	129.0
	終點				8.75#					
	對照段									
95/7/17	起點	30	晴	27	7.11#					
	控制點				7.13#	8.09	16.2	194	1.700	215.7
	終點				7.67#					
	對照段				7.46#	8.03		195		
95/8/15	起點	28	晴	24	8.12#					
	控制點				8.25#	8.38	4.09	262	0.580#	200.1
	終點				8.42#					
	對照段									

註：“*”表示符合飲用水標準

“#”表示符合台灣省灌溉用水水質標準

表 9 卓蘭主圳路現地試驗魚蝦蟹類調查之種類及數量

調查日期	種類				數量
	中文名	科名	目名	學名	
94.10					0
94.11					0
94.12					0
95.01					0
95.02					0
95.03					0
95.04					0
95.05	極樂吻鰕虎	鰕虎科	鱸目	Rhinogobius giurinus	2
95.06	極樂吻鰕虎	鰕虎科	鱸目	Rhinogobius giurinus	1
95.07	極樂吻鰕虎	鰕虎科	鱸目	Rhinogobius giurinus	2
95.08					0

到極樂吻鰕虎 1 種，鰕虎科、鱸目，學名 *Rhinogobius giurinus*，俗名有狗甘仔、苦甘仔，其為台灣之原生種。極樂吻鰕虎周緣性淡水魚，亦即屬河海迴游魚種，為雜食性，喜好攝食魚苗、落水的昆蟲及水生昆蟲。極樂吻鰕虎喜好棲息於河川的中下游、湖泊及池沼之中，散居於石縫或於石頭下方掘穴產卵其下。

經訪談結果得知，極樂吻鰕虎為在地原有之魚種而數量不多，此應與本圳路水流湍急且無隱蔽處有關。水域生物調查於 95 年 5 月份始採得魚隻，時值圳路生態改善工程施工完成 4 個月後，顯示本圳路經石樑工改善後，可提供極樂吻鰕虎適當之掩蔽與棲地環境，使其生存於此段圳路。唯魚隻數量仍少，疑與圳路施工造成之影響有關。而極樂吻鰕虎是否能於施工改善後之本圳路生息繁衍，以及是否適合其他魚種生存，則仍

有待日後繼續追蹤調查。

五、結論與建議

5.1 結 論

本研究探討既有灌溉排水矩形圳路生態改善工程，首先，進行渠底設置石樑工之土工試驗，藉由量測水位變化、計算渠流能量損失及分析淤砂情況，以及圳路流速分佈、生態棲地面積及水體溶氧量等生態性指標分析，評選石樑工最佳之配置方案；於苗栗縣卓蘭主圳路進行圳路生態改善工程，施作改良式石樑工，施工前、中及後定期進行水理、底質、水質及生物等現地調查，藉以理論與工程實務相印證，以期將石樑工應用在既有農水路生態改善工程。

土工試驗結論如下：

1. 本研究為生態工法的基礎學理研究，探討石樑工最佳之配置，並考量圳路輸水效率與淤積情形，有助於農水路生態工程之規劃與設計。
2. 本研究改良式石樑工施工容易、成本低廉，又不破壞原有圳路結構和水理安全，且能有效減少水路泥砂淤積、增加水體溶氧量，極適合應用於圳路生態改善工程。
3. 考量石樑工之渠流能量損失和淤砂量等最小，石樑工配置間距以 16 倍堆石直徑為宜，且以三角形向上游延伸 45 度排列之改良式石樑工為佳。

現地試驗調查結果如下：

1. 現地渠底設置改良式石樑工，可減緩圳路水流流速，且不造成水路淤積，增加水體溶氧量，產生多樣性的流況，有利於不同物種的生存。
2. 圳路現地水質調查結果顯示， $\text{NH}_3\text{-N}$ 值會隨果園生產採收而增高，濁度值則會隨取水河川上游降雨而升高。其餘各項水質檢測值均在農田灌溉用水可接受水質範圍內。
3. 圳路魚類調查僅記錄到極樂吻蝦虎 1 種，於改善工程施作後始採得魚隻，顯示此圳路經改良式石樑工施作後，可提供適宜的水域環

境。唯魚隻數量少，仍有待日後繼續追蹤調查。

5.2 建 議

1. 本圳路水流較為湍急，對照段測得流速最高達 1.829 m/sec，經改善工程設置改良式石樑工後，流速仍在 1.2 ~ 1.5 m/sec，未達到生態理想水理棲地所需流速低於 1.2 m/sec 之需求。由於，本研究受限於場址和經費，僅施作 6 座改良式石樑工，總長度 55.61 m，未來可增加石樑工施作長度，以降低圳路之水流速度。
2. 圳路中設置石樑工具有減緩流速的功能，然堆石處將形成急流段，魚類是否能生存其間或迴游越過此處，值得以生物的角度進一步探討。
3. 卓蘭主圳以灌溉為主的水路，兼具區域排水的功能，平日需灌溉時才有進水，休耕期間則停水，水生生物無法生存期間，阻絕了水路生態的延續性。故建議休耕期間仍放流生態基流量，或每隔一段距離於圳路渠底設置滯水池，以改善灌溉水路生態無法延續的問題。

致 謝

本研究承蒙國科會研究計畫 NSC 94 - 2211 - E - 078 - 001 和萬能科技大學專題研究計畫 VIT - 94 - CE - 01 等經費資助，台中農田水利會提供現地圳路試驗場址，卓蘭工作站同仁的鼎力相助，中原大學土研所研究生洪偉哲和梁嘉翔、萬能科技大學營科系專題生陳偉強和江慶星等在水工試驗和現地調查的協助，農工中心梁榮元和陳奇麟等在生物調查的協助，特此致謝。

參考文獻

1. Neill, C. R., 1968, " Note on initial movement of coarse uniform material, " Journal of Hydraulic Research, Vol. 17, No. 2, 247-249.
2. 王桑村, 2001, 「農田水利生態與綠美化」, 九十年農業工程研討會, 國立台灣大學,

- 台北市，719-723。
3. 日本農村水產省農村振興局，2004，「事業實施考慮以環境調和的調查、規劃、設計指引—基本的考慮方向(水路整備)」，日本農村水產省農村振興局計畫部事業計畫課監修，社團法人農業土木學會，149。
 4. 行政院公共工程委員會，「全國生態工程入口網」，<http://eem.pcc.gov.tw/natural/index.php>。
 5. 林秉賢，2002，「橫向堆石群對溪流生態棲地流況之影響」，逢甲大學土木及水利工程研究所，碩士論文，台中市。
 6. 周憲德、吳沛倫、王新貴、張藝馨，2002，「裸露圓柱橋基之局部沖刷分析」，中國土木水利工程學刊，第 14 卷第 4 期，631-640。
 7. 洪勇善，2000，「生態工法之安全分析」，生態工法理論與實務研討會，國立台北科技大學，台北市，92 - 93。
 8. 洪偉哲，2006，「植生渠道水理性質之研究」，中原大學土木工程研究所，碩士論文，桃園中壢。
 9. 施漢鵬，2004，「丁壩於河川棲地改善之試驗研究」，逢甲大學水利工程研究所，碩士論文，台中市。
 10. 黃宏斌、林雲峴 2002，「固床工水理研究」，91 年度農業工程研討會，雲林農田水利會，雲林斗六，190-199。
 11. 郭昌樺，2002，「固床工間距對河床穩定性影響之研究」，國立中興大學水土保持研究所，碩士論文，台中市。
 12. 陳明儀，2005，「農業灌溉水路生態工程之應用與評估研究」，朝陽科技大學營建工程研究所，碩士論文，台中市。
 13. 陳獻，2003，「農水路生態工法構造與材料」，九十二年度農水路生態工法研習班，桃園中壢，58-72。
 14. 張耿偉，2003，「固床工型態對棲地影響之研究」，逢甲大學土木水利工程研究所，碩士論文，台中市。
 15. 游繁結、黃政達，1996，「固床工之動床模型試驗」，中華水土保持學報，第 27 卷第 3 期，245-253。
 16. 梁惟喬，2004，「固床工改善對河道底床環境影響之試驗研究」，逢甲大學水利工程研究所，碩士論文，台中市。
 17. 葉明峰、李訓煌、張世倉，2000，「台灣鐘額魚及台灣石濱游泳能力之研究」，行政院農業委員會特有生物研究保育中心，棲地生態組。
 18. 蔡逸文、陳獻、張斐章，2005，「灌排水路應用生態工法實施流程之擬議」，農業工程學報，第 51 卷第 3 期，74 - 86。

收稿日期：民國 96 年 1 月 8 日

修正日期：民國 96 年 3 月 15 日

接受日期：民國 96 年 3 月 16 日