
不安定土砂改變河道寬度進而影響河川形
貌及土砂運移之研究

Study on unstable sediment altering
channel width to affect fluvial
geomorphology and sediment transport
(成果報告)

執行單位：國立成功大學

執行期間：113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：賴悅仁 副教授

共同主持人：

協同主持人：

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 113 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本分署施政參考)



不安定土砂改變河道寬度進而影響河川形貌 及土砂運移之研究

摘要

在部份受限制的河谷中，當河道寬度及河岸形狀改變後，可能會影響河道之流量、流速、河川形貌及土砂運移，甚至威脅鄰近地區之安全性。然而，過去的研究中少有學者仔細探究不安定土砂如何改變河道寬度進而影響河道之河川形貌及土砂運移。因此，本研究計畫透過物理實驗及水理動床模式，定量討論不安定土砂以沖積扇形式佔據河道寬度比例，對於河道之辮狀程度、沙洲型態及土砂運移之影響。透過本研究計畫可獲得：(1) 高精度之數位地形資料；(2) 侵蝕和堆積分佈圖；(3) 辮狀指數之演化趨勢；(4) 沙洲幾何參數之演化趨勢；(5) 活躍辮狀指數與無因次水流功率之關係；(6) 二維水理模擬成果；(7) 實驗與數模之比較成果；(8) 模式之參數檢定與建議；(9) 推估河道中土砂災害之影響範圍。本研究結果將有助於理解不安定土砂進入河道後，土砂之災害影響範圍，以提供水土保持設計規劃之科學參考依據。

關鍵詞：不安定土砂、河川形貌、土砂運移、物理實驗、數值模擬

Study on unstable sediment altering channel width to affect fluvial geomorphology and sediment transport

Abstract

In some restricted river valleys, changes in channel width and bank shape can affect channel discharge, flow velocity, river morphology, and sediment transport, potentially threatening the safety of nearby areas. However, past research has rarely explored in detail how unstable sediment alters channel width, thereby influencing river morphology and sediment transport. Therefore, this research project aims to quantitatively discuss the impact of unstable sediment occupying a proportion of channel width in the form of alluvial fans on the braiding intensity, bar morphology, and sediment transport of the channel through physical experiments and hydraulic movable bed models. This research project yields: (1) high-precision digital terrain data; (2) erosion and deposition distribution maps; (3) evolution trends of braiding index; (4) evolution trends of bar geometric parameters; (5) relationship between active braiding index and dimensionless stream power; (6) results of two-dimensional hydraulic simulations; (7) comparison results between experiments and numerical models; (8) model parameter verification and recommendations; (9) estimation of the impact range of sediment hazards in channels. The results of this study will contribute to understanding the impact range of sediment hazards after unstable sediment enters the channel, providing a scientific reference basis for soil and water conservation design and planning.

Keywords: unstable sediments, river morphology, sediment transport, physical experiments, numerical simulation

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	IV
圖次.....	V
一、前言	1-1
第一節 擬解決問題	1-1
第二節 計畫目標	1-4
二、工作執行方法與步驟	2-1
第一節 工作執行方法	2-1
三、工作進度與交付項目	3-1
第一節 計畫甘特圖	3-1
第二節 計畫交付項目	3-2
四、成果報告	4-1
第一節 實驗配置	4-1
第二節 數位影像處理	4-14
第三節 實驗結果	4-23
五、結論及建議	5-1
第一節 結論	5-1
第二節 建議	5-2
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形 ...	附錄-1
附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形 ...	附錄-5

附錄三、期末成果發表會會議紀錄暨回覆辦理情形

附錄-11

表次

表 3-1 計畫甘特圖.....	3-1
表 4-1 實驗組數.....	4-11
表 4-2 率定實驗組.....	4-12
表 4-3 曼寧粗糙係數測試組數	4-74
表 4-4 曼寧係數與溝床床面泥沙代表粒徑之關係式	4-75



圖次

圖 1-1 (A)不安定土砂進入部份受限制之河谷之示意圖(修改自 FRYIRS AND BRIERLEY, 2010); (B) 不安定土砂之分佈影響河川形貌及土砂分佈之示意圖(修改自 GRAY AND HARDING, 2007)。	1-1
圖 2-1 全新打造中之中大型動床水槽。	2-1
圖 2-2 數值高程模型之示意圖(HUANG ET AL., 2023)。	2-2
圖 2-3 活動辮狀指數之分析示意圖(HUANG ET AL., 2023)。	2-3
圖 2-4 沙洲幾何分析之示意圖。	2-4
圖 2-5 沖淤分佈之示意圖(HUANG ET AL., 2023)。	2-5
圖 2-6 模擬之水流分佈示意圖(HUANG ET AL., 2023)。	2-6
圖 2-7 iRIC 模擬之流速分佈示意圖(IWASAKI ET AL., 2016)。	2-7
圖 2-8 透過數值模式推估災害影響範圍之示意圖(WILLIAMS ET AL., 2016)。	2-8
圖 4-1 實驗水槽配置圖	4-2
圖 4-2 水槽本體	4-3
圖 4-3 實驗區段	4-4
圖 4-4 閘門系統	4-5
圖 4-5 供砂系統	4-6
圖 4-6 水砂分離池	4-6
圖 4-7 半圓形沖積扇	4-8
圖 4-8 黃光地燈	4-9
圖 4-9 數位單眼相機。	4-10
圖 4-10 數位攝影機。	4-10
圖 4-11 實驗流程圖	4-13

圖 4-12 相機校正拍攝視域	4-15
圖 4-13 攝影機校正拍攝視域	4-16
圖 4-14 相機的投影中心	4-17
圖 4-15 攝影機的投影中心	4-17
圖 4-16 正射影像圖(ORTHOPHOTO).....	4-18
圖 4-17 數位高程模型(DEM)示意圖	4-21
圖 4-18 光源陰影圖.....	4-22
圖 4-19 A1 各時間點之正射影像圖	4-25
圖 4-20 A1 各時間點之正射影像圖	4-25
圖 4-21 A1 各時間點之正射影像圖(續).....	4-26
圖 4-22 A2 各時間點之正射影像圖	4-27
圖 4-23 A2 各時間點之正射影像圖(續).....	4-28
圖 4-24 A3 各時間點之正射影像圖	4-29
圖 4-25 A3 各時間點之正射影像圖(續).....	4-30
圖 4-26 B1 各時間點之正射影像圖	4-32
圖 4-27 B1 各時間點之正射影像圖(續).....	4-33
圖 4-28 B2 各時間點之正射影像圖	4-34
圖 4-29 B2 各時間點之正射影像圖(續).....	4-35
圖 4-30 B3 各時間點之正射影像圖	4-36
圖 4-31 B3 各時間點之正射影像圖(續).....	4-37
圖 4-32 A1 各時間點之光源陰影圖	4-39
圖 4-33 A2 各時間點之光源陰影圖	4-40
圖 4-34 A3 各時間點之光源陰影圖	4-41
圖 4-35 B1 各時間點之光源陰影圖	4-42
圖 4-36 B2 各時間點之光源陰影圖	4-43

圖 4-37 B3 各時間點之光源陰影圖	4-44
圖 4-38 A 系列及 B 系列之活躍瓣狀指數隨時間的變化	4-47
圖 4-39 A 系列及 B 系列之砂洲長寬比隨時間的變化	4-49
圖 4-40 A 系列及 B 系列之砂洲緊緻度隨時間的變化	4-49
圖 4-41 A1 實驗之河寬隨時間的變化	4-52
圖 4-42 A1 實驗之河寬隨時間演化圖	4-52
圖 4-43 A2 實驗之河寬隨時間的變化	4-54
圖 4-44 A2 實驗之河寬隨時間演化圖	4-54
圖 4-45 A3 實驗之河寬隨時間的變化	4-56
圖 4-46 A3 實驗之河寬隨時間演化圖	4-56
圖 4-47 B1 實驗之河寬隨時間的變化	4-58
圖 4-48 B1 實驗之河寬隨時間演化圖	4-58
圖 4-49 B2 實驗之河寬隨時間的變化	4-60
圖 4-50 B2 實驗之河寬隨時間演化圖	4-60
圖 4-51 B3 實驗之河寬隨時間的變化	4-62
圖 4-52 B3 實驗之河寬隨時間演化圖	4-62
圖 4-53 A1 實驗各階段相減之數值高程差異圖	4-64
圖 4-54 A2 實驗各階段相減之數值高程差異圖	4-65
圖 4-55 A3 實驗各階段相減之數值高程差異圖	4-66
圖 4-56 B1 實驗各階段相減之數值高程差異圖	4-67
圖 4-57 B2 實驗各階段相減之數值高程差異圖	4-68
圖 4-58 B3 實驗各階段相減之數值高程差異圖	4-69
圖 4-59 匯入 NAYS2DH 之地形資料	4-71
圖 4-60 於地形上建置網格	4-72
圖 4-61 實驗及各式曼寧粗糙係數所模擬之水流對比圖	4-77

圖 4-62 實驗及各式曼寧粗糙係數所模擬之光源陰影對比圖	4-78
圖 4-63 A1 及 A3 模擬之水流結果比較圖	4-80
圖 4-64 A1 及 A3 模擬之水流結果比較圖(續).....	4-81
圖 4-65 A1 及 A3 模擬之光源陰影比較圖	4-81
圖 4-66 A1 及 A3 模擬之光源陰影比較圖(續).....	4-82
圖 4-67 A3 實驗與模擬之水流結果比較圖	4-84
圖 4-68 A3 實驗與模擬之水流結果比較圖(續)	4-85
圖 4-69 A3 實驗與模擬之光源陰影比較圖	4-85
圖 4-70 A3 實驗與模擬之光源陰影比較圖(續)	4-86
圖 4-71 不同尺寸之側向沖積扇	4-87
圖 4-72 側向沖積扇所導致之上游堆積現象(以 A 系列為例).....	4-88
圖 4-73 側向沖積扇所導致的右岸侵蝕現象(以 A 系列為例).....	4-89
圖 4-74 側向沖積扇所導致的下游保護現象(以 A 系列為例).....	4-90



一、前言

第一節 擬解決問題

當不安定土砂進入河道時，若無法被河流帶往下游，便會在河道中堆積出未流出之土砂。當降雨誘發土砂災害時，可能導致河道束縮，形成河道瓶頸段(圖 1)。在部份受限制的河谷 (partly-confined valley) 之中，當河道寬度及河岸形狀改變之後，可能會影響河道之流量、流速、河川形貌及土砂運移，甚至威脅鄰近地區安全(Gray and Harding, 2007; O'Brien et al., 2019; Fryirs and Brierley, 2010; Buffington and Montgomery, 2021)。因此，我們需要密切關注這些受限制河谷之土砂變化，並採取相應的措施來維護河道的穩定和保障附近地區的安全。

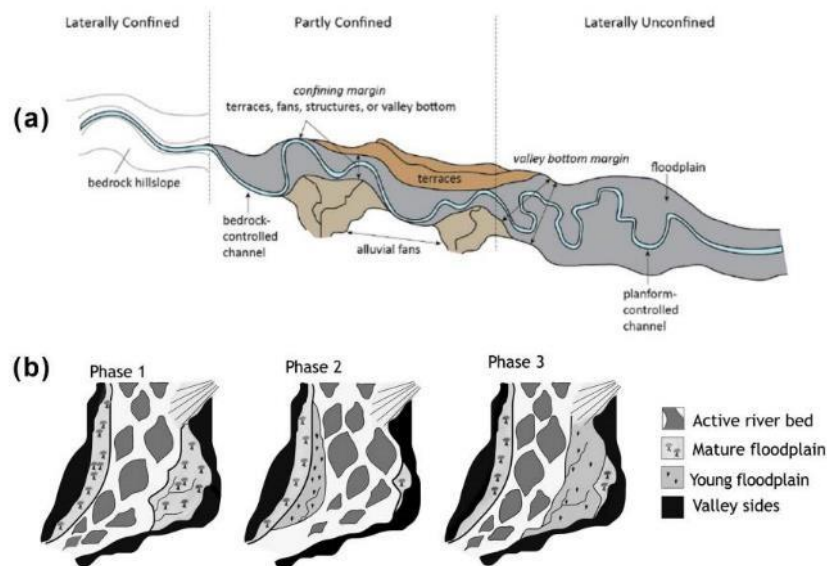


圖 1-1 (a)不安定土砂進入部份受限制之河谷之示意圖(修改自 Fryirs and Brierley, 2010); (b) 不安定土砂之分佈影響河川形貌及土砂分佈之示意圖(修改自 Gray and Harding, 2007)。

根據過往經驗，不安定土砂進入河道可能對河道的流量和流速產生影響，進而對沿岸地區的防洪能力造成威脅。針對不安定土砂進入河道的研究相當重要，例如：(1) 不安定土砂的形成機制：探討不安定土砂進入河道的成因，包括土壤侵蝕、土石流等因素，以了解不安定土砂的形成機制；(2) 不安定土砂的運移行為：研究不安定土砂在河道中的運移行為，包括堆積、沖刷、河床變化等，以評估不安定土砂對河道的影響；(3) 河道工程對不安定土砂的影響：探討河道工程對不安定土砂的影響，包括河道瓶頸段的形成、河道寬度及河岸形狀的變化等，以提出相應的工程對策。此外，研究不安定土砂有三個重要意義：(1) 災害防治：不安定土砂在降雨誘發的土砂災害中扮演著重要角色。了解不安定土砂的運移行為和影響因素，可以提供更有效的災害預警和防治措施，減少災害對人民生命財產的傷害；(2) 水資源管理：不安定土砂對河道的束縮和河相變化可能影響水流的流量和流速。這對水資源管理至關重要，特別是在提供可靠的供水和洪水防治方面；(3) 基礎建設規劃：了解不安定土砂的運移機制和堆積模式，可以幫助規劃者在基礎建設項目中考慮土砂管理和河道穩定性，確保基礎建設的長期可持續性。

然而，過去的研究中少有學者仔細探究不安定土砂改變河道寬度進而影響河道之河川形貌及土砂運移。如果我們能夠仔細觀察變化中的水砂資料及河相演化，並將其作為模式的科學驗證資料，我們便能更準確地推估河道中土砂的運移及災害影響範圍。這樣的研究將能夠為我們提供更多關於河道演化和相應災害的重要信息，從而幫助我們制定更有效的水土保持技術規範。因此，本研究計畫擬透過物理實驗及水理模式，探究河道寬度及河岸形狀如何影響河道之變狀程度、沙洲型態及土砂運移。預計透過本研究計畫可獲得：

- 1.高精度之數位地形資料
- 2.侵蝕和堆積分佈圖
- 3.變狀指數之演化趨勢
- 4.沙洲幾何參數之演化趨勢
- 5.活躍變狀指數與無因次水流功率之關係
- 6.二維水理模擬成果
- 7.實驗與數模之比較成果
- 8.模式之參數檢定與建議
- 9.推估河道中土砂災害之影響範圍

第二節 計畫目標

1. 全程目標

誠如農業部農村發展及水土保持署 113 年度「創新研究計畫」公開徵求說明之執行課題「軟體防災與新興科技應用」之「(6) 集水區不安定土砂相關研究」提及，河道可能殘存不安定土砂，或是河道上堆積出未流出之土砂，可能受到降雨誘發土砂災害。可利用數值模擬推估集水區不安定土砂運移行為，模擬可能之影響範圍。本計畫之主要目的是以物理實驗及數值模式探究不安定土砂如何改變河道寬度，進而影響河川形貌及土砂運移。研究成果將有助於更好的理解不安定土砂影響河道的情況，並提出相應的防治措施，以確保河道的安全性和穩定性。

2. 本年度目標

本計畫為單一年度計畫，年度目標與全程目標相同。

二、 工作執行方法與步驟

第一節 工作執行方法

1. 研究方法

本研究之實施方法包含：

(1) 執行物理實驗，獲得數位地形資料及正射影像圖

本計畫將使用成大水利系正在打造之全新中大型動床水槽(圖 2-1)。水槽長度為 5 m，寬度為 1.2 m，深度為 0.25 m。底床坡度之可調範圍從 0 度至 10 度。砂材將採用天然河砂($d_{50} = 0.34 \text{ mm}$)。動床水槽上配有馬達驅動之移動式測量台車，可以進行雷射切頁地形掃描。預計實測之數值高程模型(digital elevation model, DEM)之精度可達 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ (圖 2-2)。透過數位影像投影技術(Lai et al., 2017; Huang et al., 2023)，可獲取每 5 秒一張之正射影像圖(orthophoto)，有助於後續進行更多河道數量及沙洲型態之分析。

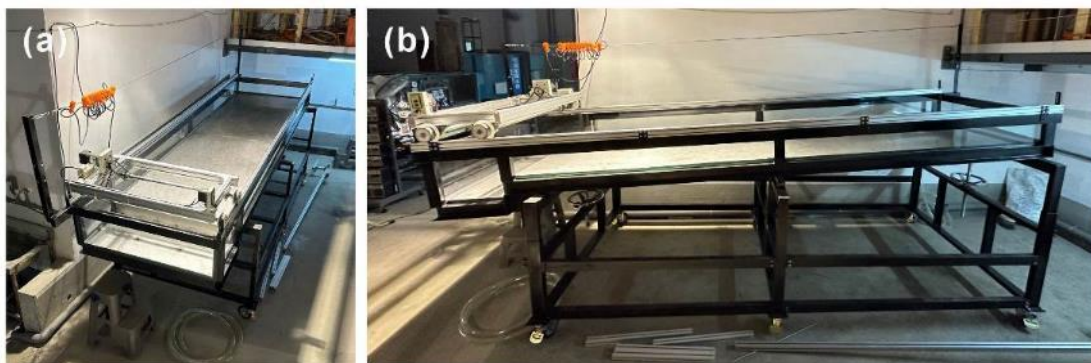


圖 2-1 全新打造中之中大型動床水槽。

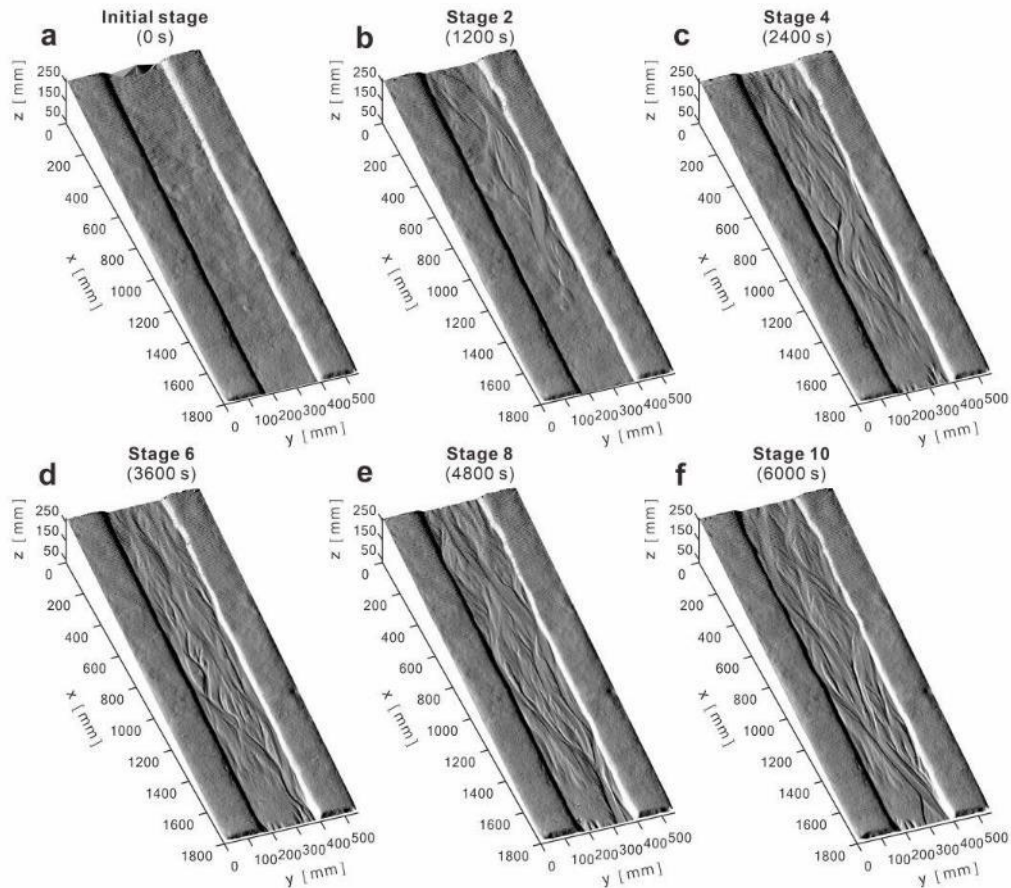


圖 2-2 數值高程模型之示意圖(Huang et al., 2023)。

(2) 執行河道之辨狀指數自動化分析

我們將開發自動化辨識河道位置及計算河道數量之影像分析方法，預計先將彩色正射影像圖轉成黑白影像後，結合訊號處理及平滑技術，找出通用又具代表性之相關參數，以精準辨識河道之位置與數量。我們亦將改進過去手動分析活動辨狀指數(active braiding intensity, BIA)之方法開發自動化計算辨狀指數之分析方法(圖 2-3)。除此之外，我們也將開發自動辨識辨狀河道活動寬度(active width)之工具，找出辨狀河道與入流水砂、無因次水流功率(dimensionless stream power)之

關係。

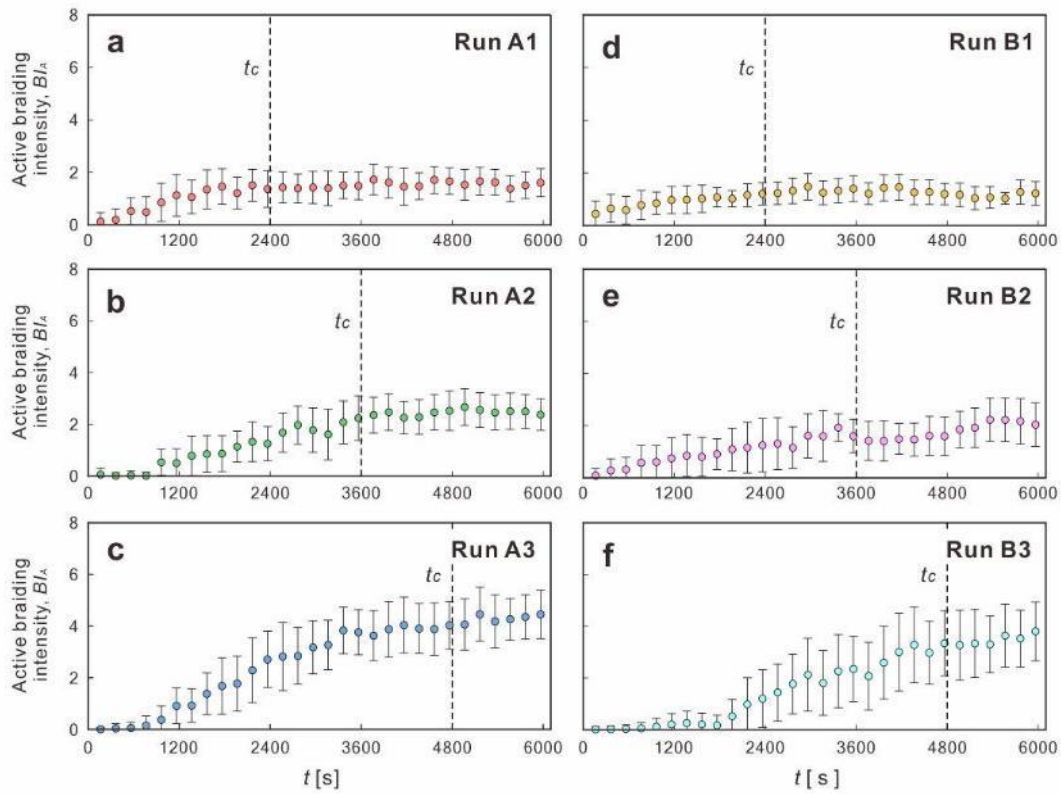


圖 2-3 活動辨狀指數之分析示意圖(Huang et al., 2023)。

(3) 執行砂洲之幾何分析與移動趨勢

我們將開發自動化辨識沙洲，本計畫將實驗的正攝影像轉換為強化灰階影像，再將強化灰階影像轉換為二質化影像。當分析沙洲時，會使二質化影像黑白對調，像素亮度值為 1(白色)表示為沙洲，而像素亮度值為 0(黑色)則表示為河道及兩岸。而利用 MATLAB 即可計算二質化影像中沙洲的長軸、短軸、面積、周長等幾何參數(圖 2-4)，追蹤沙洲之演化趨勢，進行相關的統計分析，找出沙洲與來水來

砂等物理量之關聯性和移動趨勢。實驗分析結果可作為後續數值模式之驗證資料。

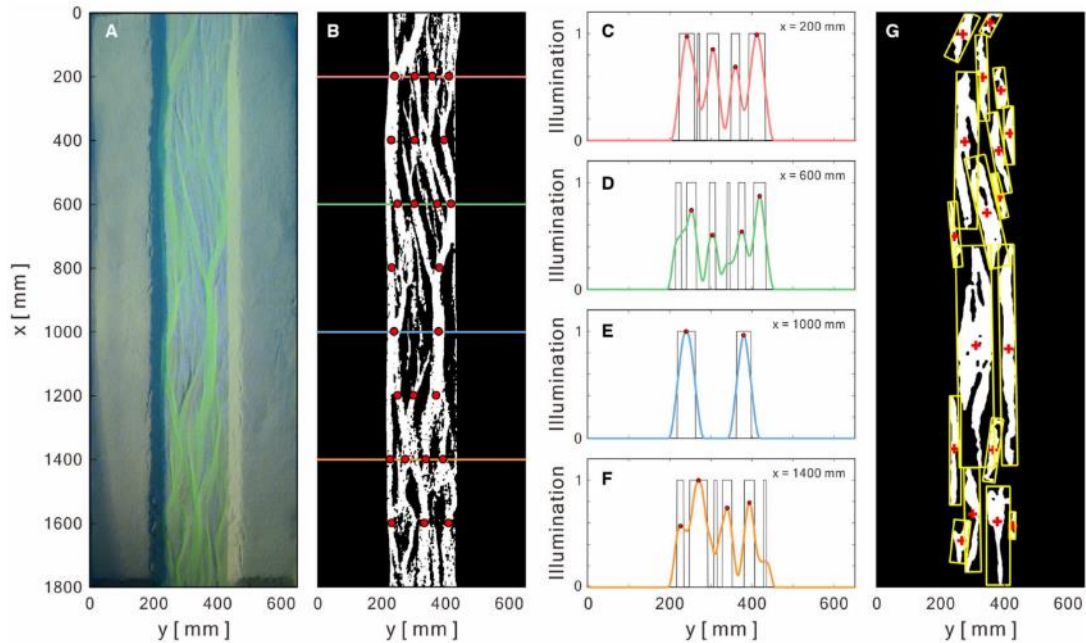


圖 2-4 沙洲幾何分析之示意圖(Lai et al., 2024)。

(4) 執行泥沙沖淤變化分析

各階段獲取之 DEM 可以製作出沖淤變化圖(DEM of difference, DoD)(圖 2-5)，將有助於了解不安定土砂影響河寬後，又被河道沖刷帶走之土砂分佈。在地形演化過程中欲推估泥砂之沖淤量，往往都是研究中最有挑戰性的工作。實驗結果可以作為模式參數調整率定之參考依據。

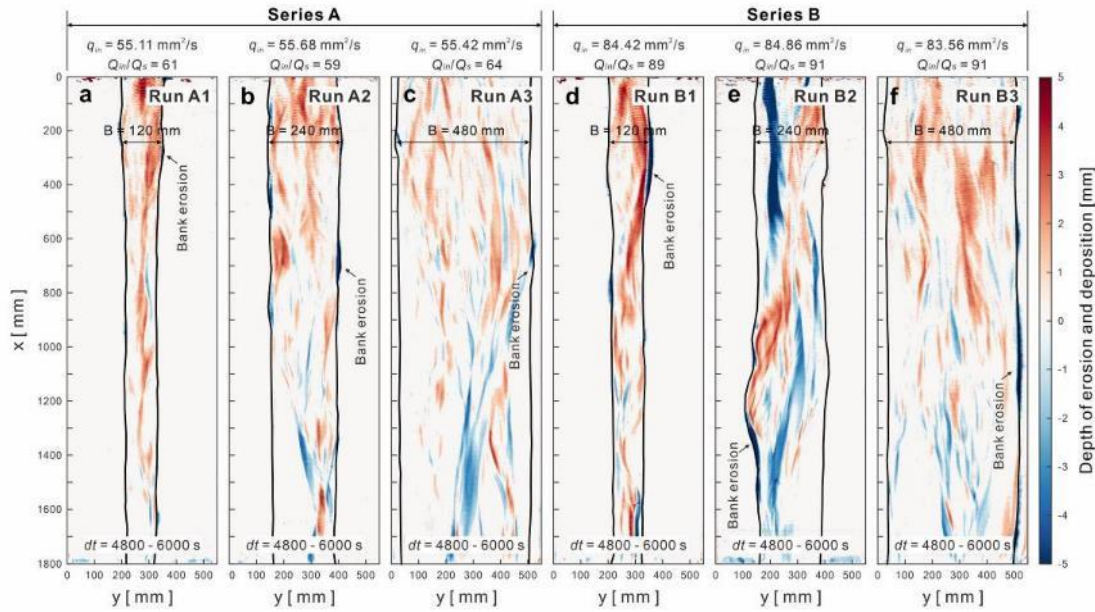


圖 2-5 沖淤分佈之示意圖(Huang et al., 2023)。

(5) 執行數值模式

本計畫將使用 iRIC (International River Interface Cooperative)之最新版本(v.4)進行數值模擬。此軟體由日本北海道大學 Yasuyuki Shimizu 教授和美國地質調查局(USGS)的 Jonathan Nelson 博士於 2007 年發起，專門為河川工程的問題提供各種免費的計算求解器，包括洪水預測、降雨逕流形成、土石流、生態環境評估及海嘯模擬等功能。iRIC 的操作是於介面中輸入各項參數以進行模擬，操作面板形式簡單且易懂，讓使用者可以快速學習並利用該軟體解決現實世界中的問題。iRIC 軟體內部包含許多計算求解器，如 Nays2DH、FaSTMECH、Morpho2DH、NaysCUBE 及 CERI1D 等，可分別求取一維、二維及三

維的河流流動或各種形貌動力學上之問題。而其中 Nays2DH 是由日本北海道大學的團隊所開發，以非均勻曲線網格模擬變量流及河床演變的二維模型，該模型於變量流計算方面受到許多學者的肯定，並且能夠動態地展示水流流況。本計畫將採用 Nays2DH 模組，匯入實驗地形資料後，以模擬河道之流場分佈(圖 2-6)，進而取得流速、流線、渦度等水理資訊(圖 2-7)。再透過 iRIC 軟體內部之 GELATO 模組，追蹤水面顆粒運動，進而模擬顆粒運動之軌跡。最後，本計畫也將執行 Nays2DH 之動床模式，並仔細探究此模式之對於動床實驗之模擬能力。

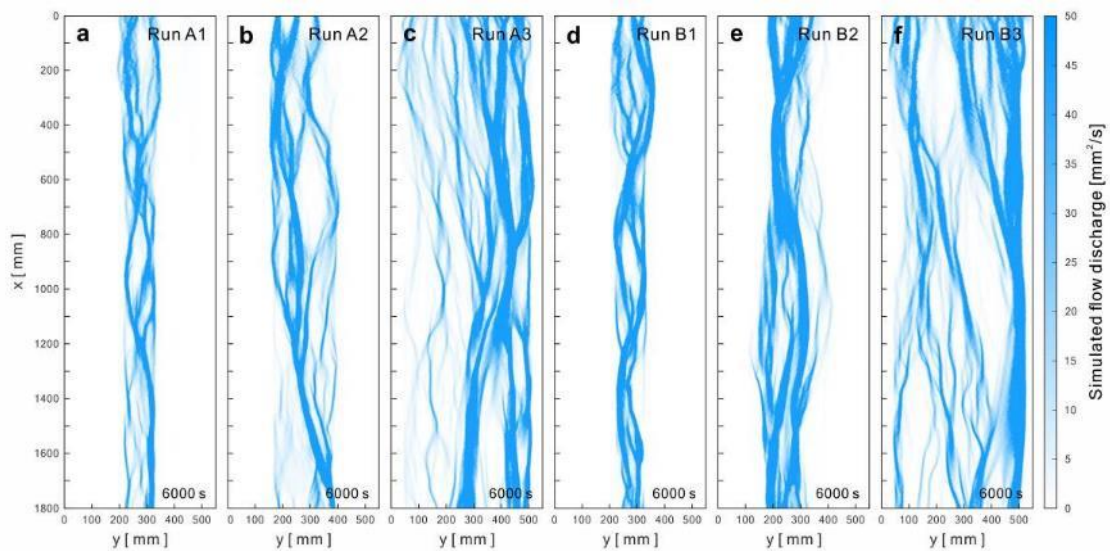


圖 2-6 模擬之水流分佈示意圖(Huang et al., 2023)。

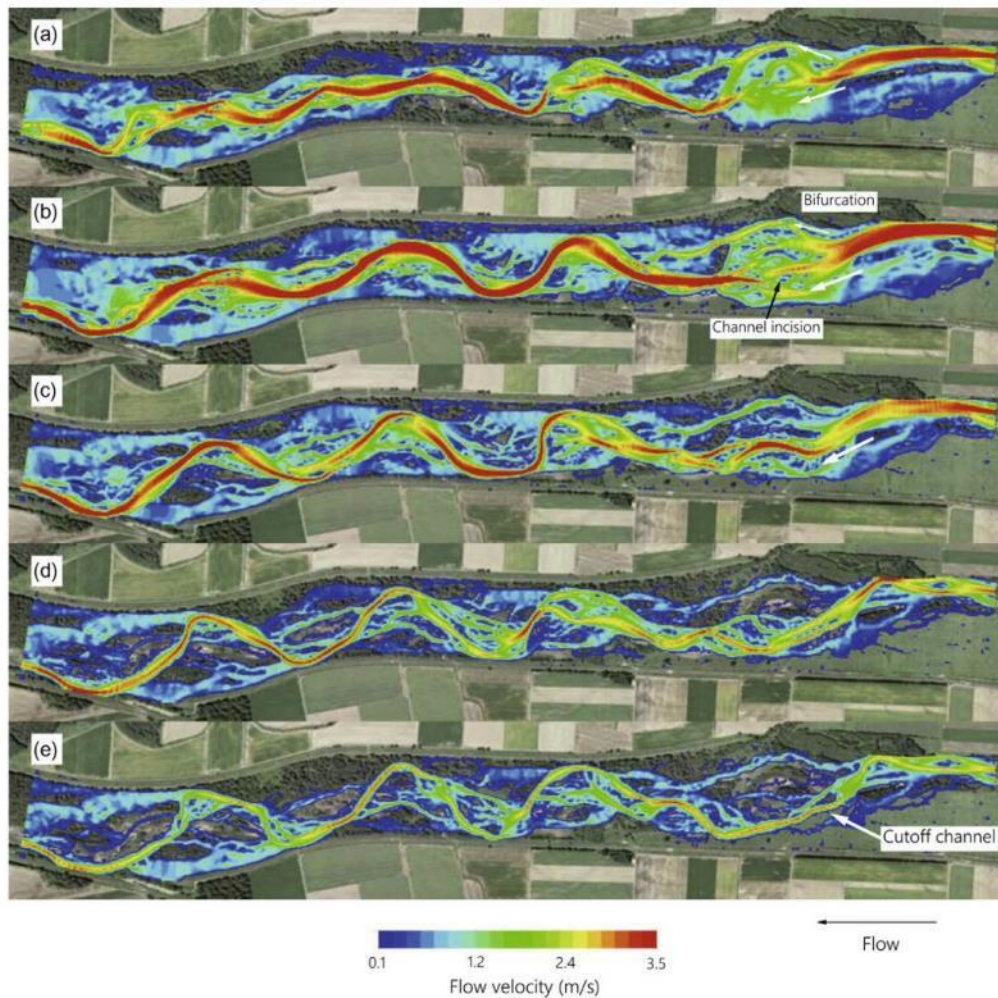


圖 2-7 iRIC 模擬之流速分佈示意圖(Iwasaki et al., 2016)。

(6) 參數敏感度分析，推估河道中土砂災害之影響範圍

模式之邊界條件及參數設定都會影響模擬結果。因此，比較不同水流條件及泥砂公式，將有助於率定出適合的參數，如時間步長及曼寧 n 值。iRIC 中本計畫會使用的計算處理器是 Nays2DH，而 Nays2DH 中只考慮底床載及懸浮載，因沖洗載不會影響河道形貌。底床載計算公式可選擇 M.P.M formula 或 Ashida and Michiue formula，而懸浮載計算公式可選擇 Itakura and Kishi formula 或 Lane-Kalinske formula。

累積建立多種模擬情境資料庫，亦可增加對模式之掌握，進而推估河道中土砂災害之影響範圍(圖 2-8)。

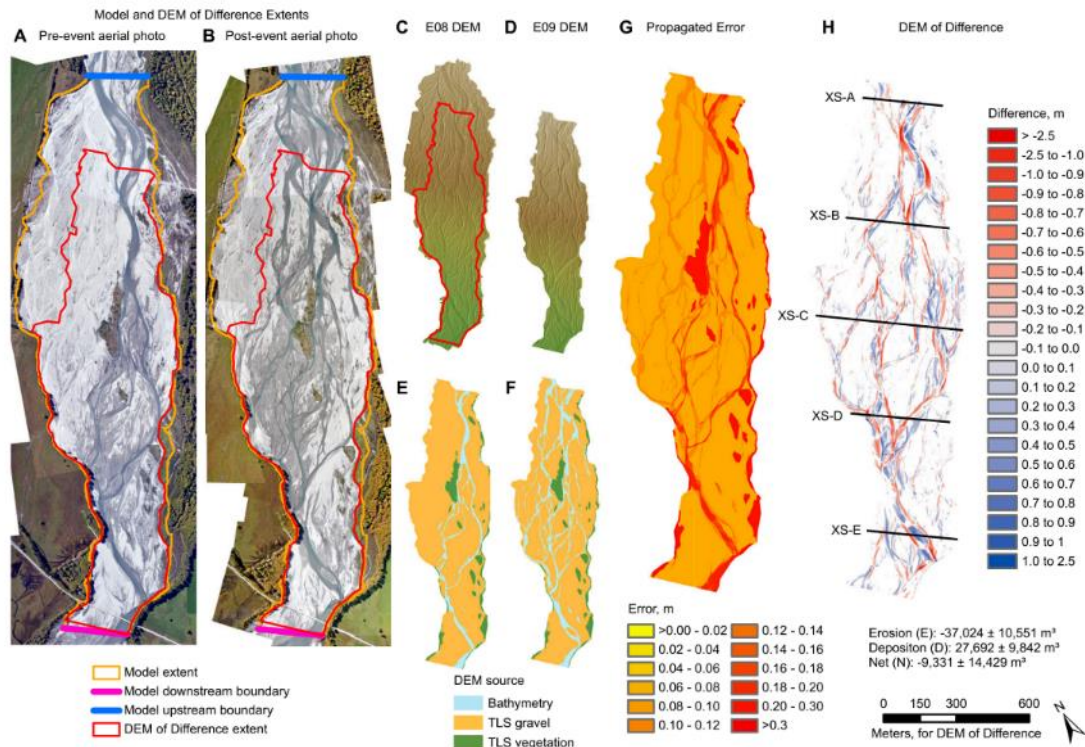


圖 2-8 透過數值模式推估災害影響範圍之示意圖(Williams et al., 2016)。

2. 研究流程

本計畫預計以一年期計畫進行，研究流程包含：

- (1) 建造動型水槽之供水供砂系統。
- (2) 規劃起始地形及水砂條件。
- (3) 執行物理實驗、建置數值高程模型及正射影像圖。
- (4) 執行辯狀指數及沙洲型態之自動化分析。
- (5) 執行泥沙沖淤變化分析。

- (6) 執行數值模擬及參數敏感度分析。
- (7) 比較物理實驗及數值模擬之成果。
- (8) 推估河道中土砂災害之影響範圍。

3. 預期可能遭受之困難與解決途徑

可能遭遇困難 1: 持續改變的 DEM, 該如何建立具代表性之沖淤分佈圖?

解決途徑: 透過 DoD, 可以了解指定時間內, 因為地形改變所產生之侵蝕與堆積分佈。我們將以每個階段(預計為 30 min)所量測到的 DEM 進行相減, 以了解土砂在該階段內之侵蝕和堆積分佈。而每個階段該設定為多久時間, 將透過實驗多次試誤後決定。

可能遭遇困難 2: 二維平面之數模是否能代表三維的流場?

解決途徑: 不同的數值模式有各自擅長之處。欲進行三維的流場模擬, 就需要設定及率定更多的參數, 也需要犧牲計算時間。三維的模式對於硬體設備之要求也較高, 需要更高階的電腦工作站, 也相當耗時。本計畫選用 iRIC 的 Nays2DH 做為數值模擬工具, 已有許多文獻證實 Nays2DH 模式是高效、值得信賴的水理模式, 實務應用價值相

當高，入門操作門檻也較低。

可能遭遇困難 3: iRIC 模式中使用之參數如何率定?

解決途徑: iRIC 模式中，我們將定量比較模擬與實驗之水流分佈。

透過修改模式中之相關參數，進行參數敏感度分析，計算誤差百分比，找出最佳之模式設定。在動床方面，將比較模式與實驗之 DoD 分佈差異，以找出模式最佳設定。

4. 本研究之重要性與創新性

台灣山區河川常會有不安定土砂進入河道之中，若有未流出之土砂，會造成河道之寬度改變，形成河道瓶頸段，進而危害民眾生命財產安全。本計畫之主要目的是以物理實驗及數值模式探究不安定土砂如何改變河道寬度，進而影響河川形貌及土砂運移。研究過程中預計開發多種自動化影像分析方法。研究成果將有助於更好的理解不安定土砂影響河道的情況，並提出相應的防治措施，以確保河道的安全性和穩定性，也可以供後續水土保持設計規劃之參考。

三、 工作進度與交付項目

第一節 計畫甘特圖

本計畫之計畫甘特圖如表 3-1 所示，已完成所有項目，符合規劃進度。

表 3-1 計畫甘特圖

研究項目 \ 年月	113 年 1 月	113 年 2 月	113 年 3 月	113 年 4 月	113 年 5 月	113 年 6 月	113 年 7 月	113 年 8 月	113 年 9 月	113 年 10 月	113 年 11 月	113 年 12 月
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
(1) 建造動型水槽之供水供砂系統。	✓	✓	✓									
(2) 規劃起始地形及水砂條件。		✓	✓	✓								
(3) 執行物理實驗、建置數值高程模型及正射影像圖。			✓	✓	✓	✓						
(4) 執行辨狀指數及沙洲型態之自動化分析。						✓	✓	✓				
(5) 執行泥沙沖淤變化分析。						✓	✓	✓				
(6) 執行數值模擬及參數敏感度分析。								✓	✓	✓		

(7) 比較物理實驗及數值模擬之成果。								✓	✓	✓		
(8) 推估河道中土砂災害之影響範圍。										✓	✓	✓
(9) 期初報告提交				✓								
(10) 期中報告提交							✓					
(11) 期末報告提交											✓	
(12) 成果報告提交												✓
預定進度累積百分比 (%)	4	12	24	32	40	52	64	76	84	92	96	100

第二節 計畫交付項目

本一年期計畫已完成及待完成之工作項目如下說明：

(1) 建造動型水槽之供水供砂系統。

本計畫已將動型水槽之供水供砂系統建造完成。

(2) 規劃起始地形及水砂條件。

本計畫已將起始地形及水砂條件規劃完成。

(3) 執行物理實驗、建置數值高程模型及正射影像圖。

本計畫已完成 6 組物理實驗、數值高程模型及正射影像圖建置。

(4) 執行辯狀指數及沙洲型態之自動化分析。

本計畫已完成辯狀指數及沙洲型態之自動化分析。

(5) 執行泥沙沖淤變化分析。

本計畫已完成泥沙沖淤變化分析。

(6) 執行數值模擬及參數敏感度分析。

本計畫已完數值模擬及參數敏感度分析。

(7) 比較物理實驗及數值模擬之成果。

本計畫已完物理實驗及數值模擬之比較。

(8) 推估河道中土砂災害之影響範圍。

本計畫已完推估河道中土砂災害之影響範圍。





四、成果報告

第一節 實驗配置

本節將介紹辮狀河道之實驗配置、實驗組數與實驗流程，包含：(1) 介紹實驗水槽配置；(2) 介紹實驗中所使用之砂材；(3) 說明實驗各組的參數設定；(4) 敘述實驗進行之步驟。

1. 實驗水槽配置

本計畫使用之三維動床水槽進行實驗，水槽配置如下圖 4-1 所示。

本小節將依序說明：(i)水槽本體、(ii)實驗區域、(iii)水砂供應與排出系統、(iv)側向沖積扇鋪設方式及(v)光源配置與測量設備。

(i) 水槽本體

本計畫使用的水槽如圖 4-2，所示總長 430 公分、寬 125 公分、高 25 公分，下游處有設計下凹 12 公分的水砂分離池，有集砂的功用外也可排出實驗用水。

水槽下方設有可調整坡度之鋼架，可利用上下游的旋轉軸調整水槽坡度。本研究採 4 度為實驗固定坡度。

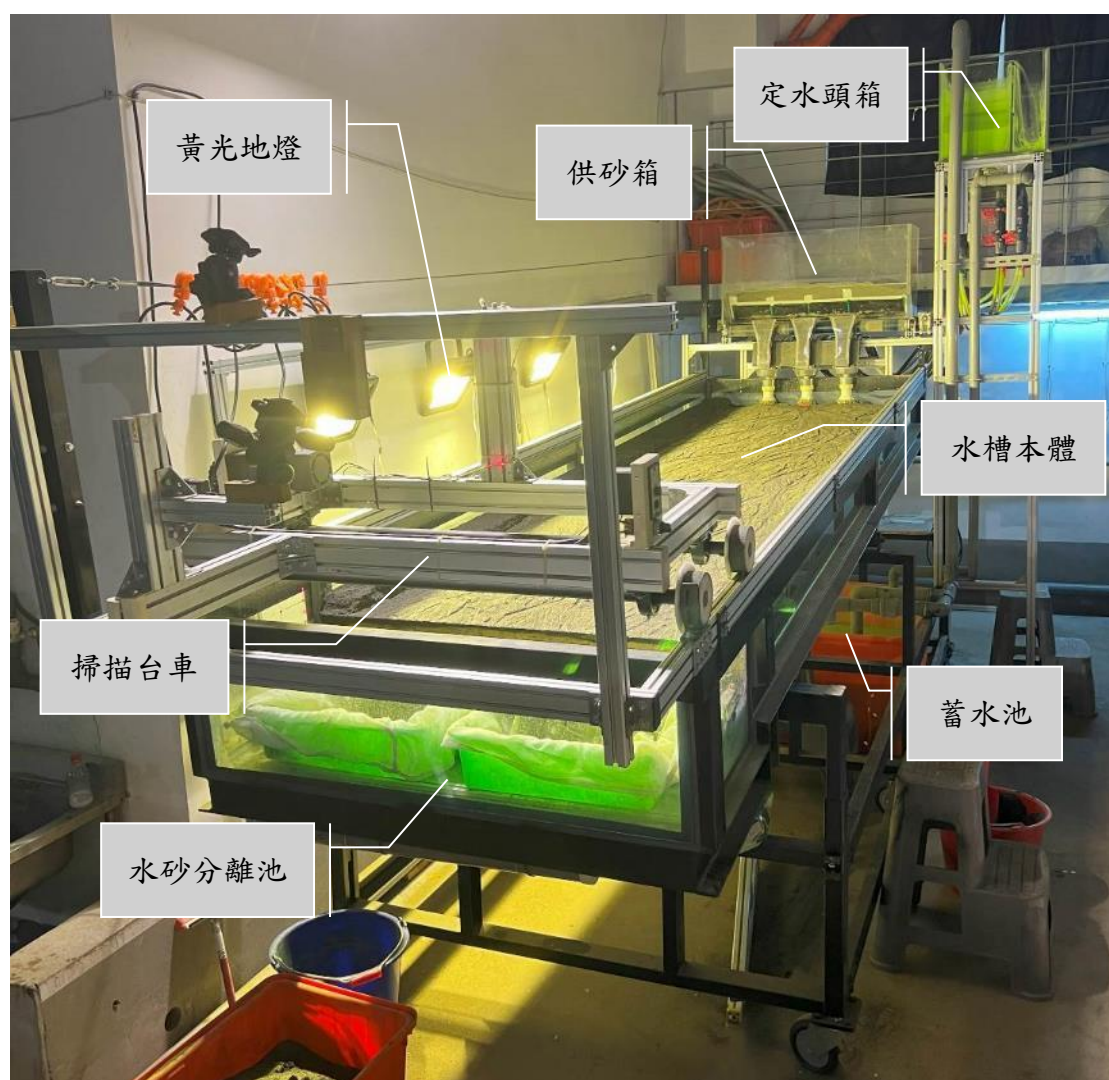


圖 4-1 實驗水槽配置圖



圖 4-2 水槽本體

(ii) 實驗區域

本計畫的實驗觀察區域如圖 4-3 所示，長 380 公分、寬 120 公分、高 5 公分。實驗開始前會在實驗區域鋪設寬度為 88 公分的直渠道，厚度均為 9 公分。兩側鋪設較渠道高約 3 公分的堤岸，可避免兩側水流直接接觸玻璃邊界。

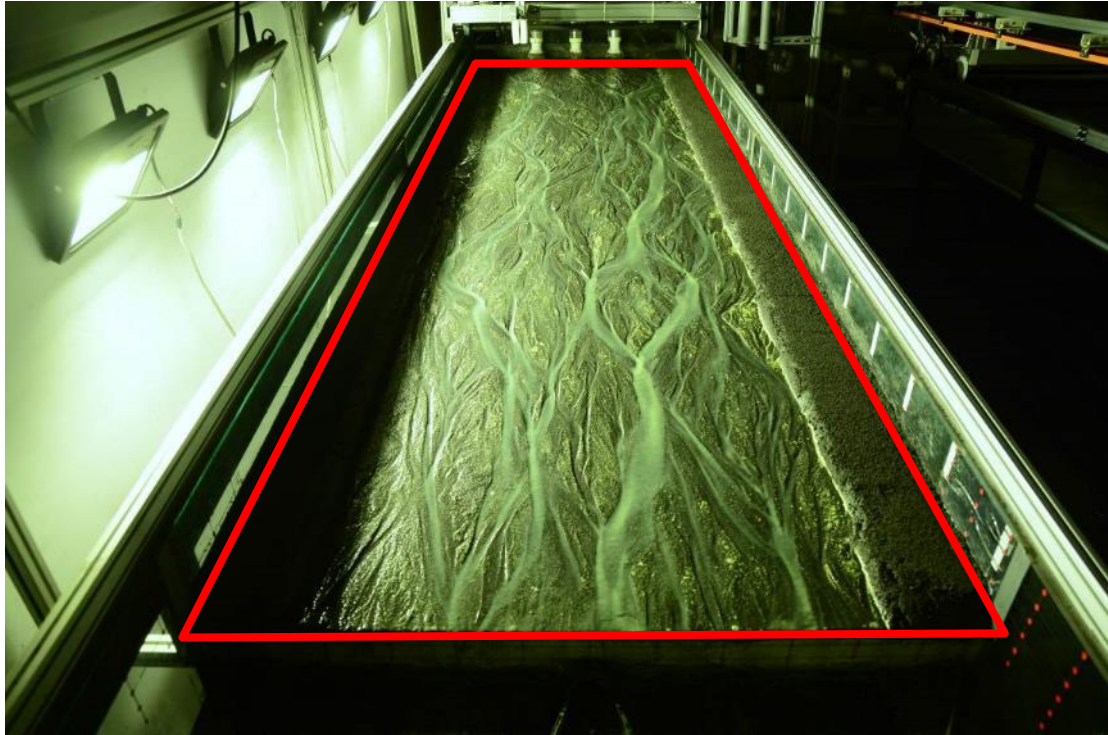


圖 4-3 實驗區段

(iii) 水砂供應與排出系統

在可調整坡度之鋼架下方有設置大型水箱，並會蓄水以供應實驗所需。另外為了讓實驗區域內水流明顯，會在水箱內加入一定比例的染劑。利用沉水馬達將調色過後的實驗用水打入上方的定水頭箱中，並在此定水頭箱下方安裝閥門系統，如圖 4-4 所示，可透過控制球閥開度調整流量大小與完成流量律定。

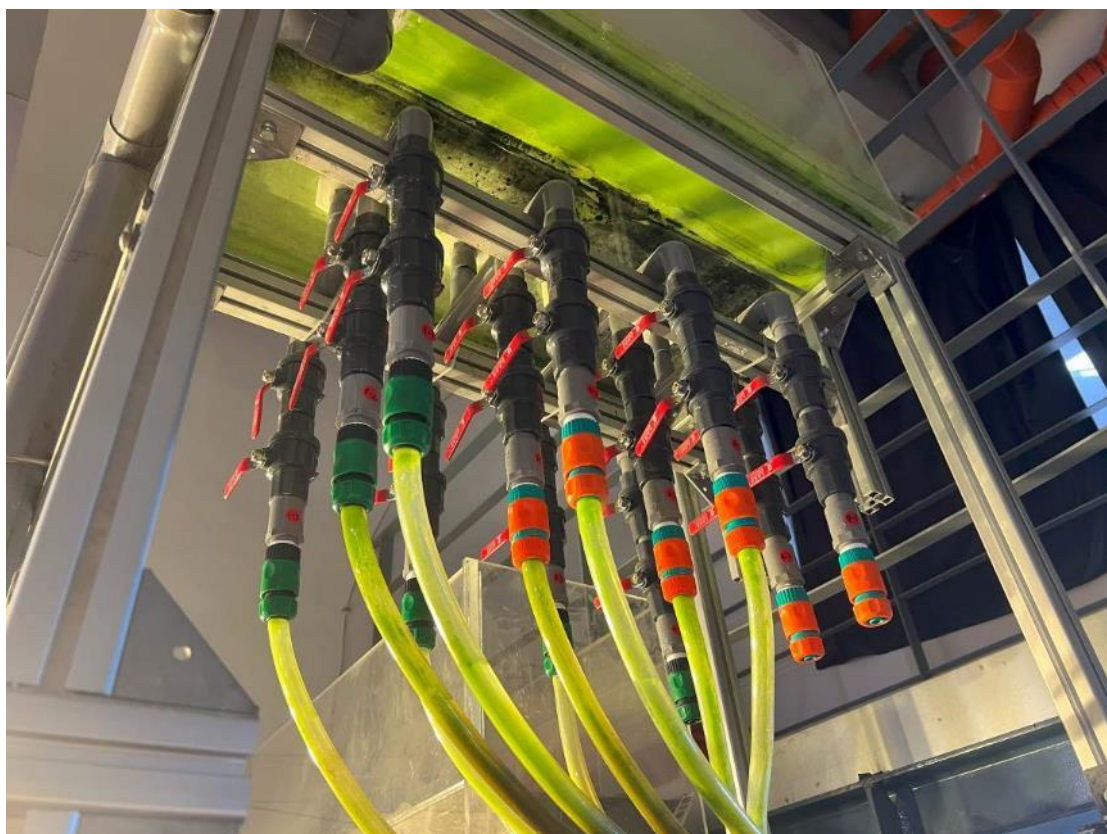


圖 4-4 閥門系統

為了使供砂於實驗階段保持穩定，本實驗在實驗區段上游設置可調速履帶機，並在其上方放置壓克力砂箱，砂箱內部設置隔板，藉由可調速履帶機以均速方式帶出砂箱內的實驗用砂，使供砂保持穩定，如圖 4-5 所示。

定水頭箱有三管水流分別導入上游的三個漏斗中，而履帶機上的實驗用砂亦會分為三道個別落入漏斗，水砂於漏斗下方的混合用圓柱中形成含砂水流，流入實驗區域內。



圖 4-5 供砂系統

在水槽下游處設計有水砂分離池，池內設有集砂箱，箱上鋪設透水性布料，並在箱底鑽孔，藉此達成水砂分離，如圖 4-6 所示。集砂箱內的實驗用砂會搜集並烘乾秤重，而實驗用水則直接排除。

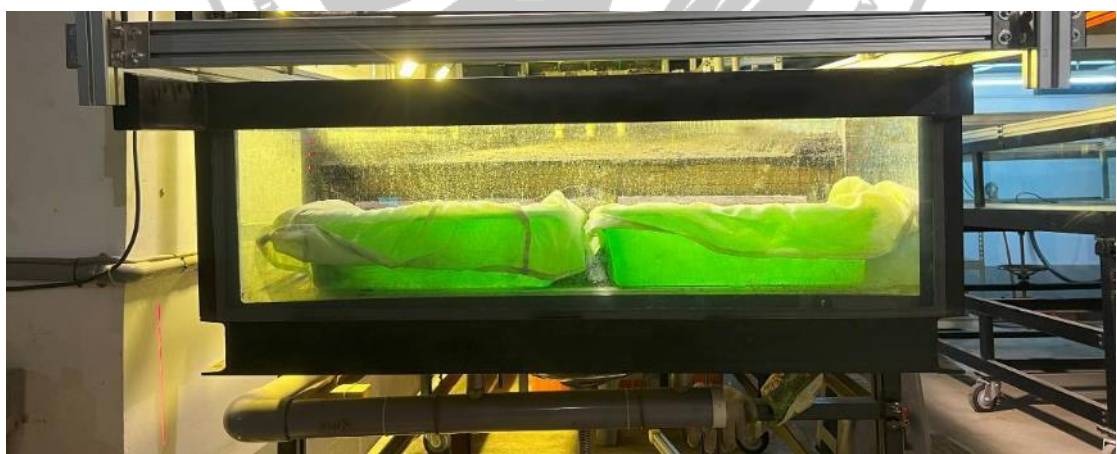


圖 4-6 水砂分離池

(iv) 側向沖積扇鋪設方式

在實驗開始後，會有需要停水並鋪設側向半圓形沖積扇的階段，故在此小節說明如何鋪設。

先將渠道內供水供砂停止後，在河段中心線的左岸處做一標記，並利用與所要鋪設的沖積扇之半徑等長的尼龍繩，一端固定於標記處，一端劃半圓。而後使用工具在範圍內鋪設約 0.5 公分的實驗用砂，便得所需的半圓形沖積扇，如圖 4-7 所示。

在本研究中，側向沖積扇的鋪設高度選擇為 0.5 公分，這一高度經過實驗測試後被確定為最佳選擇。實驗中，我們對三種不同的鋪設高度進行了比較分析，分別為 1 公分、0.5 公分及 0.25 公分。1 公分鋪設高度的沖積扇在實驗設定的流量條件下，較難受到侵蝕，因此未能有效觀察沖積扇隨時間消滅對於主河道的影響。而 0.25 公分鋪設高度條件下，沖積扇則過於脆弱，容易受到侵蝕而迅速消失，無法持續維持其設計功能。基於上述結果，選擇 0.5 公分作為沖積扇的鋪設高度，因其在實驗設定流量下能夠保持良好的穩定性與功能性。



圖 4-7 半圓形沖積扇

(v) 光源配置與測量設備。

當實驗進行時，須控制實驗室沒有任何外部環境光源，以方便控制燈光對形貌呈現的影響。為了能凸顯形貌變化，本實驗光源來自於渠槽右岸上方的四組黃光地燈，以仿日落角度照射渠槽內部，加強沙洲陰影效果，使沙洲與河道在視覺感受中能更加立體，如圖 4-8 黃光

地燈圖 4-8 所示。



圖 4-8 黃光地燈

本實驗於外槽下游端架設數位單眼相機(Nikon D7100)(圖 4-9)與數位攝影機(Sony HDR PJ760)(圖 4-10)，面向內槽拍攝。單眼相機搭配快門線遙控器，以每五秒一張間格攝影紀錄實驗地形之形貌變化，相片不僅可用來取得正射影像圖，也可以製成縮時影片。數位攝影機則是用來記錄雷射切頁掃描軌跡，於水槽上方架有線性滑軌，使雷射切頁能穩定掃描地形。在實驗前會對其進行率定，除了要保持定速確保地形資料的精度一致之外，移動速度不宜過快，否則資料精度會下降。



圖 4-9 數位單眼相機。



圖 4-10 數位攝影機。

2. 實驗砂材

本實驗採用天然河砂作為實驗砂材，此天然河砂為里港黑砂，經過烘箱以 150°C 烘乾 900 分鐘及搖篩機過篩後，取用篩號 #20 (粒徑 0.84mm) 至篩號 #50 (粒徑 0.297mm) 之間的粒徑作為實驗用砂，且鋪於內水槽中及加砂系統所採用的砂材為相同配比之砂材。取用 450g 的乾砂於小型搖篩機中進行篩分析，所得到之中值粒徑 (median grain size, d_{50}) 約為 0.43mm ，均勻係數 (uniformity coefficient, $C_u = d_{60}/d_{10}$) 為 1.69。

3. 實驗組數及參數

實驗總組數為 10 組，如表 4-1 所示，本計畫挑出其中 6 組成功且具有研究價值的組別進行探討。水槽坡度皆維持 4 度，各組之實驗總時長皆為 255 分鐘，先進行 30 分鐘的辮狀發展階段，而後加入側向半圓形沖積扇後，進行 45 分鐘一階段共 5 階段的主實驗階段。辮狀發展

階段的時間長度是根據先前測試的結果而訂定，發現在給定實驗條件的水砂比下，30 分鐘足夠使原本的平整主河道發展為辮狀型態，故取 30 分鐘為辮狀發展階段的時間長度。

表 4-1 實驗組數

Run	r/B	Q_w (cm ³ /s)	Q_s (cm ³ /s)	Q_w / Q_s	Total Time (s)	Successful
Run-01	X	53.80	0.91	59.15	10800	test
Run-02	X	82.64	0.91	90.86	10800	test
Run-03	50%	82.45	0.91	90.65	12600	X
Run-04	50%	82.04	0.91	90.20	15300	X
Run-05	25%	82.17	0.91	90.34	15300	V
Run-06	75%	82.78	0.91	91.01	15300	V
Run-07	50%	82.20	0.91	90.37	15300	V
Run-08	50%	54.73	0.91	60.17	15300	V
Run-09	25%	55.38	0.91	60.89	15300	V
Run-10	75%	55.80	0.91	61.35	15300	V

在實驗內可調整的因子為水砂比 (Q_w/Q_s) 以及側向沖積扇之半徑與主河道河寬的比值 (r/B)，依照改變的因子可以將 6 組實驗分為系列 A 與系列 B，如表 4-2 所示。

系列 A 共有 3 組實驗，水砂比控制在 60。在此系列中僅改變側向沖積扇之半徑與主河道寬的比值，分別為 25%、50%及 75%。

系列 B 共有 3 組實驗，水砂比控制在 90。在此系列中僅改變側向沖積扇之半徑與主河道寬的比值，分別為 25%、50%及 75%。

表 4-2 率定實驗組

Run	Real run	r/B	Slope (Degree)	Q_w (cm ³ /s)	Q_s (cm ³ /s)	Q_w / Q_s
A1	Run-09	25%	4	55.38	0.91	60.89
A2	Run-08	50%	4	54.73	0.91	60.17
A3	Run-10	75%	4	55.80	0.91	61.35
B1	Run-05	25%	4	82.17	0.91	90.34
B2	Run-07	50%	4	82.20	0.91	90.37
B3	Run-06	75%	4	82.78	0.91	91.01

4. 實驗流程

實驗流程如圖 4-11 所示，每組實驗共有 6 個實驗階段，會先進行 30 分鐘的辮狀發展階段，而後進行 5 個時長 45 分鐘共 225 分鐘的主實驗階段。於掃描地形時，需確保實驗環境全黑，攝影機影像只能出現打在地形上雷射光線。



圖 4-11 實驗流程圖

第二節 數位影像處理

參考 Lai (2010) 及 張崇羽 (2019) 的地形掃描測量系統，並加以修正成適合本實驗的影像處理技術。分析所需的資料為數位單眼相機每 5 秒間隔攝影所得的相片，以及每個實驗階段結束後由攝影機記錄的雷射掃描影片。將分析所需的資料匯入 MATLAB 中進行分析。主要流程分為兩部分，影像分析及建置數值高程模型。

1. 影像分析

影像分析依序分成影像校正、影片轉檔、影像處理及抓取雷射線四步驟，其簡易概念為利用 MATLAB 將需校正的相片及影片與實際座標連結，獲得座標轉換矩陣後，再將各階段的地形掃描影片轉成相片檔並進行處理，最後再將相片上二維的雷射線轉換至三維空間中，並建置數值高程模型，本節將詳述其過程。

(i) 影像校正

由於本實驗所使用的紀錄設備有相機及攝影機，因此相機及攝影機都需分別進行校正。校正的首要步驟為建立實驗區域的內水槽模型邊界及座標系統 xyz ，順水流向為 x 軸，和水流方向垂直為 y 軸，而地形高程方向為 z 軸並將內水槽邊界上的記號作為控制點 (control points) 的座標匯入 MATLAB 中，當控制點愈多時，後續分析所得的數值地形模型會更加準確。由於內水槽邊界上的座標皆為相對於內水

槽左上角原點的座標，一旦內水槽調整坡度時，其內水槽上的座標並不會隨著坡度升降而改變，因此此內水槽相對座標需要透過坡度所抬升的角度將座標(xyz) 轉換成絕對座標系統 XYZ 中的座標值。

另外相機及攝影機的拍攝目標分別為水槽全域及雷射線區域，造成視角、視域不同，所以，相機拍攝範圍包含的控制點共有 79 個 (圖 4-12)，而攝影機拍攝範圍包含的控制點位為 52 個 (圖 4-13)。為確保每次校正時的所拍攝到的控制點數量及其絕對座標皆相同，台車都會靠緊滑軌上的檔板使得台車相對於控制點的位置皆相同



圖 4-12 相機校正拍攝視域

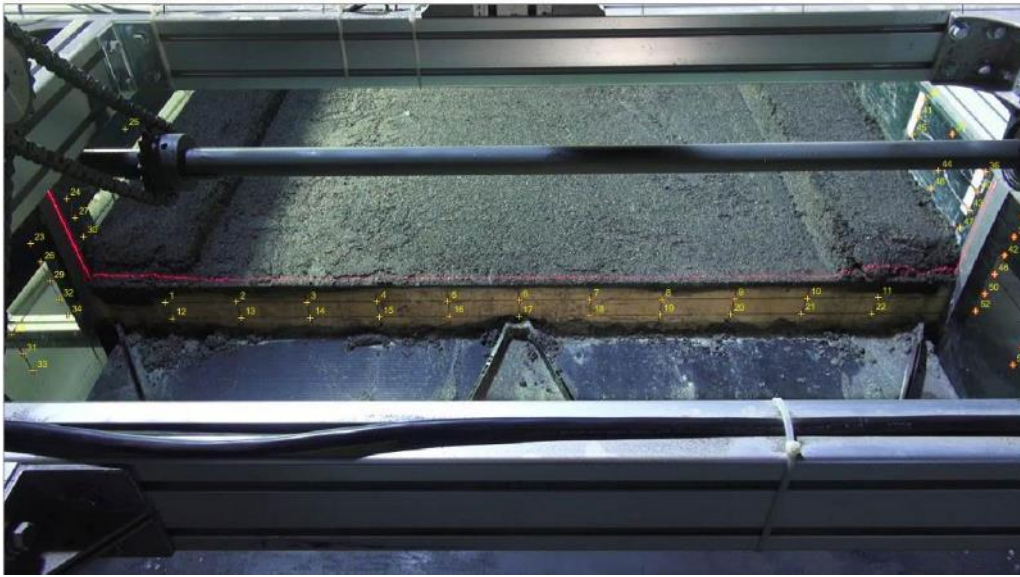


圖 4-13 攝影機校正拍攝視域

接著，校正攝影機所需的相片是由校正影片轉檔後挑選中間之一張相片而得，此相片和校正相機所需的相片會各別匯入並進行校正程序，原理皆是透過 MATLAB 辨別控制點並利用游標點出各控制點在相片中的位置，即可將相片中的座標與實際水槽的三維卡氏座標進行連結，並分別計算出相機及攝影機的校正投影矩陣 (Calibrate projection matrix) 及投影中心 (Projection Center)，如圖 4-14、圖 4-15 所示，後續便可以將攝影機的校正投影矩陣套用在該次實驗中每個階段地形掃描的座標轉換，亦可將相機的校正投影矩陣套用在生成正射影像 (Orthophoto)，如圖 4-16 所示。

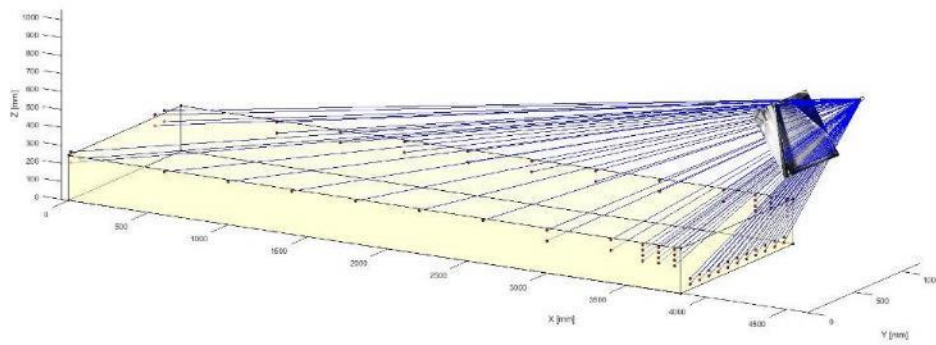


圖 4-14 相機的投影中心

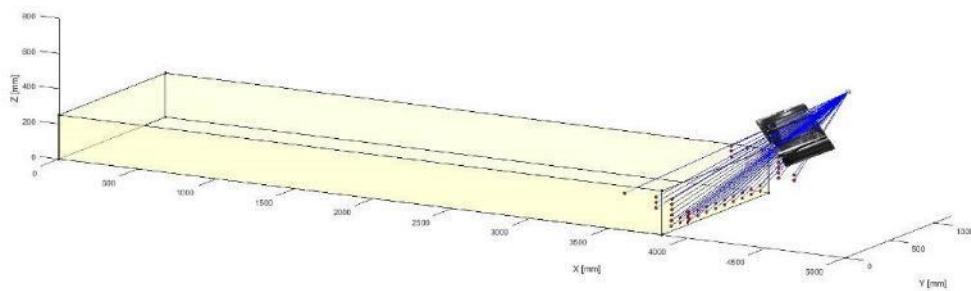


圖 4-15 攝影機的投影中心

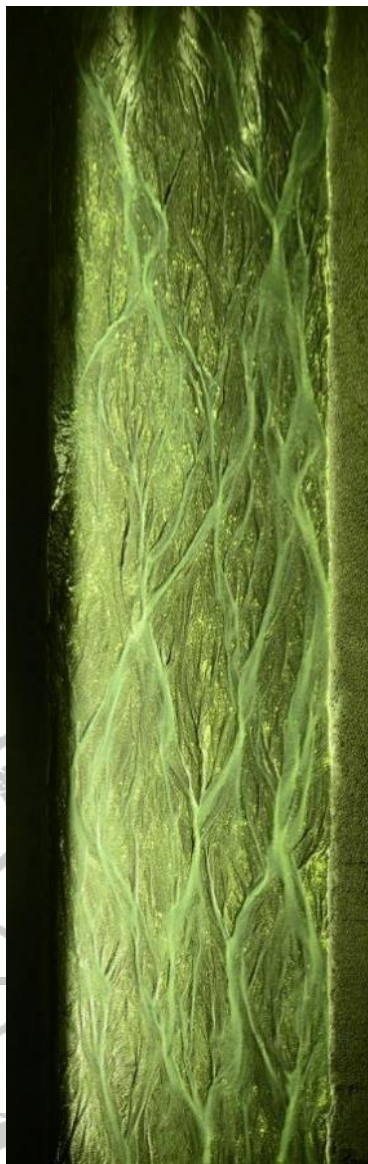


圖 4-16 正射影像圖(orthophoto)

(ii) 影片轉檔

將攝影機記錄的雷射線掃描影片 (MP4) 以 1 秒 24 張 (24fps) 輸出成可攜式網路圖像格式 (PNG)。雷射掃描由下游往上游掃描之長度範圍為 380 公分，為使雷射掃描所得到的地形資料達到 1mm 之網格解析度，輸出的相片張數需確保達到 3800 張以上，因此，掃描時間太短會造成相片張數不足，而掃描時間太長則會造成資料處理時間

增加，本實驗之輸出相片張數皆超過 3800 張，表示掃描出來的地形經地形內插得到之網格解析度為 1mm。

(iii) 影像處理

此步驟是為了將由掃描影片轉成相片的圖檔經過影像處理後作為抓取雷射線的前置作業，以下將分為五個子步驟詳述。

a. 挑選實驗區段內相片

由於攝影機所記錄的雷射線掃描區段是超過實驗觀察區段的範圍，會利用雷射光線掃描到內水槽左岸的白色標籤之反射情況作為判釋，每個白色標籤的下游側距下個白色標籤下游側之間距為 20 公分，實驗觀察區段中共包含了 20 個白色標籤。

b. 使用濾波器並調整亮度門檻值

由於雷射線具有寬度，若是直接將原始相片進行位置判讀會造成誤差，因此會需要針對雷射線進行調整。每次分析都需先從中挑出一張相片進行測試，套用二項式濾波器 (Binomial filter) 將雷射線平滑化，並設定合適的亮度門檻值幫助抓取雷射線訊號。

c. 圈選實驗觀察區段

在實驗觀察區段中全部的相片會先以每隔 20 張取 1 張相片為單位進行長曝光 (long exposure) 方式疊加成一張相片，由於攝影機和

雷射線之相對位置不變，因此，雷射線只會在固定範圍內以垂直方向上下移動，並框選此僅有雷射線的範圍以便去除實驗觀察區段範圍外之區域並填為黑色 (black out)

d. 批次套用濾波器、亮度門檻值及實驗觀察區段範圍

將以上步驟中所測試完之合適條件套入實驗觀察區段內所有原始雷射線相片中，並批次輸出已調整的雷射線，作為新的雷射線相片。

e. 抓取雷射線並歸位

先前所進行的影像處理，包含雷射線平滑化及去除雜訊，便是為了在此步驟中可以用雷射線的亮值峰值進行雷射線抓取。在此步驟中，同樣先以單張相片作為雷射線抓取之測試，確認抓取效果後便可以批次套用至所有雷射線相片中。在此步驟中亦會建立相片編號之矩陣 (k-Markers) 以及相片編號所對應到的內水槽參考點 x 座標之矩陣 (x-Markers)，透過內水槽抬升的坡度可以將內水槽參考點的 x 座標校正成傾斜後的 X 座標，這兩個矩陣之間的關係可以得知台車速率是否穩定。

2. 數值高程模型建置

抓取出完整的雷射線後，即可開始建置數值高程模型。首先，利用校正時求出的校準投影矩陣將二維空間的雷射線轉換至三維空間

卡氏座標上。轉換為三維資料並將其插入實驗觀察區域的xyz網格中，且確保精度等於 1 mm，即可取得此地形的數值高程模型，如圖 4-17 所示。

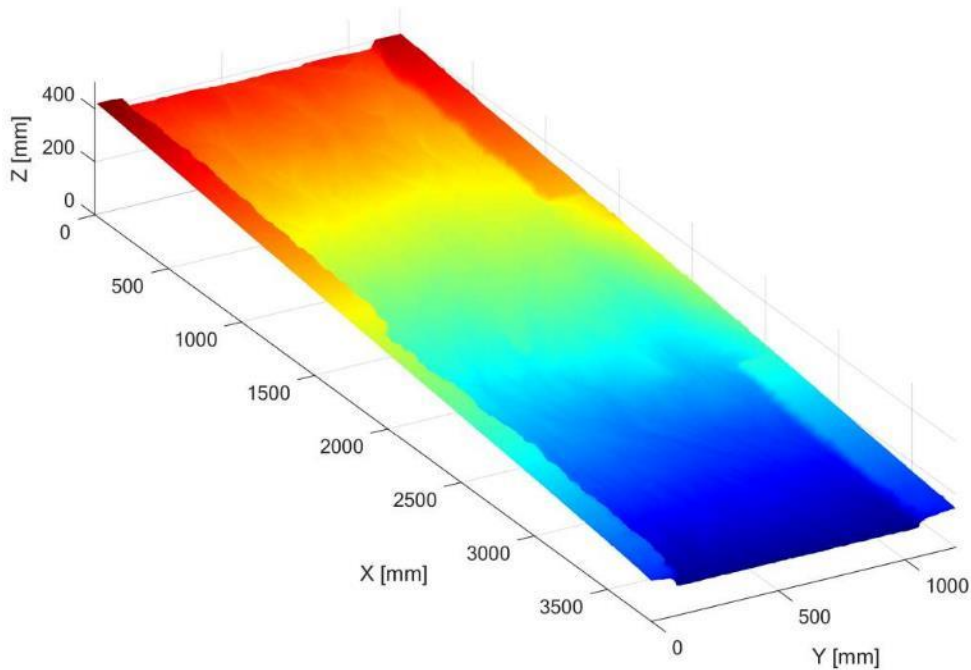


圖 4-17 數位高程模型(DEM)示意圖

建出數值高程模型後，為了能凸顯地形上的細節以方便觀察形貌變化，會將其作成光源陰影圖(Hillshade)，如圖 4-18 所示，在地形側邊設計假光源後，光影對比讓地形起伏的細節更加明顯，相較數值高程模型會更加直觀。

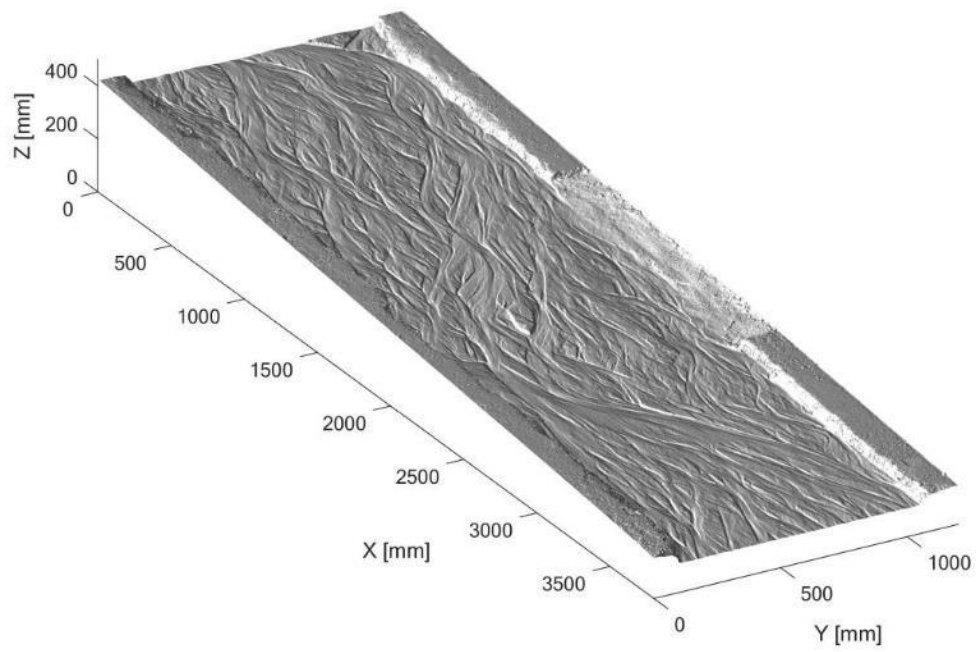


圖 4-18 光源陰影圖



第三節 實驗結果

本節會展示出表 4-2 中所列出 6 組的實驗地形資料，並以正射影像圖及光源陰影圖呈現。

1. 正射影像圖

辮狀河道發展迅速，並且有著持續變動的動態性。因此在實驗中會利用單眼相機每 5 秒一張的間格攝影來記錄河道隨時間的演變。又因單眼相機所拍攝之原始照片因角度問題較難清楚觀察並分析形貌演化，故將照片進行影像校正，產出實際比例之正射影像圖，有利於深入了解辮狀河道形貌演變歷程(圖 4-20 至圖 4-31)。以下將分別展示 6 組實驗，以八個不同時間點展示。時間點 $T=0$ 表示實驗尚未開始前的正射影像，而 $T=1800$ 代表辮狀發展階段結束，而後出現的第二張 $T=1800$ 則為鋪設完側向沖積扇的正射影像。往後的五個時間點則分別為主實驗每階段結束當下的正射影像。

其中圖 4-20 至圖 4-25 為實驗 A 系列之正射影像圖，3 組實驗皆會在 1800 秒結束辮狀發展階段，停水並分別鋪設半徑為 22 公分(A1)、44 公分(A2)及 66 公分(A3)的半圓形沖積扇於河段中心線左岸。A1(即圖 4-20 至圖 4-21)，於 4500 秒可看出水流因撞擊側向可侵蝕沖積扇而使其於下游處產生明顯的主河道，但辮狀型態依舊存在。而隨時間推移，在 9900 秒時辮狀河道重新回到沖積扇原本存在的區域，可以得知

此時間點對主河道而言沖積扇的影響已大致調適完畢。

A2(即圖 4-22 至圖 4-23)於 4500 秒可觀察到在實驗段中下游，水流因側向沖積扇的影響使其匯聚成主河道，並持續在偏右岸的位置發展。隨時間發展，側向沖積扇對主河道的影響逐漸縮小，於實驗結束的 15300 秒時，水流因側向沖積扇的影響縮小而能擴大流域，但仍無法擴張到左岸。

A3(即圖 4-24 至圖 4-25)於 4500 秒，因沖積扇的比例較 A2 大，故可觀察到水流於右岸匯聚成更為明顯的主河道，並在中段河道有明顯的右岸侵蝕。直到實驗結束時的 15300 秒，水流都集中於靠右岸處形成主河道，並有零星的次要河道出現在中左岸。



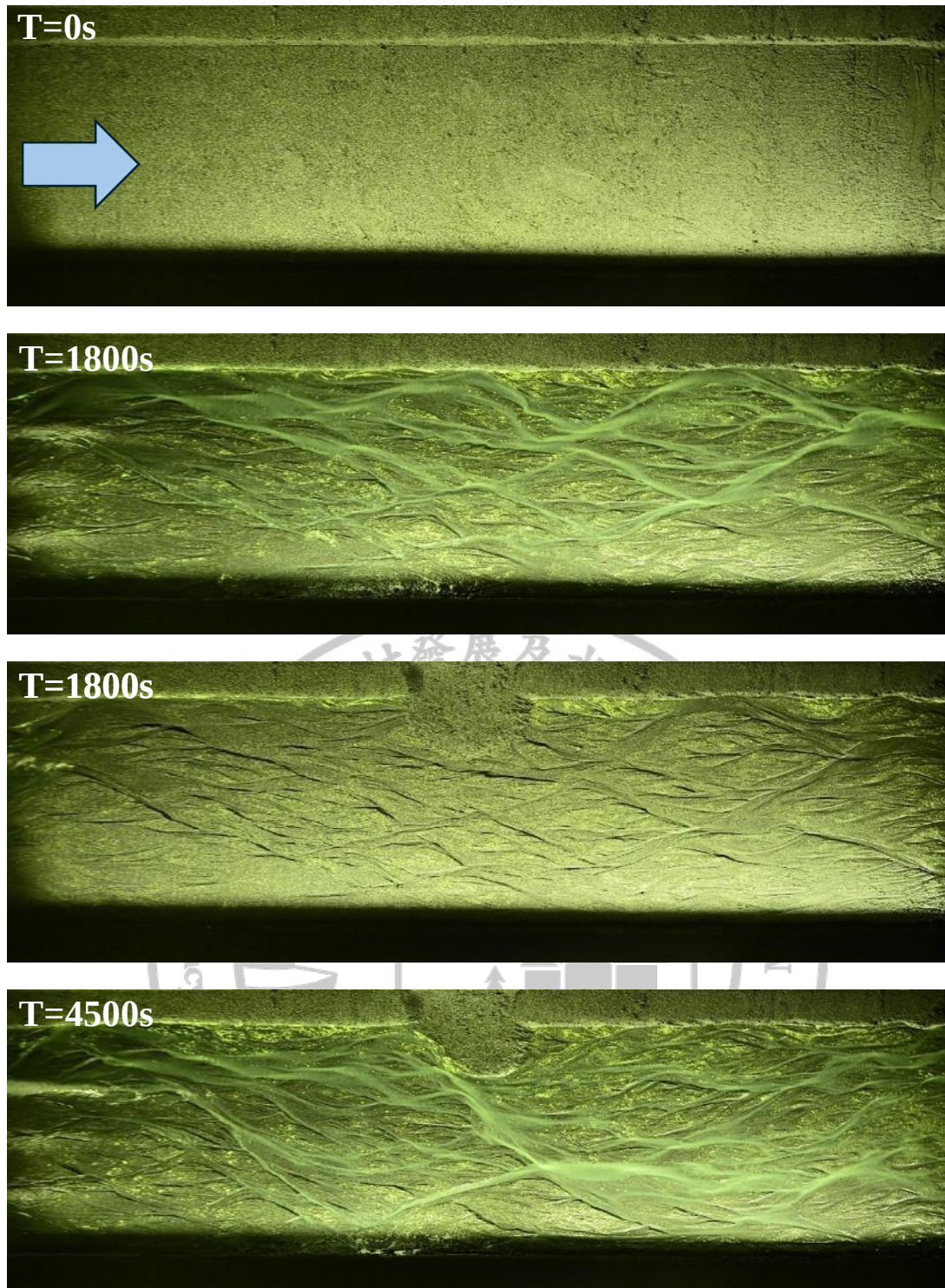


圖 4-19 A1 各時間點之正射影像圖

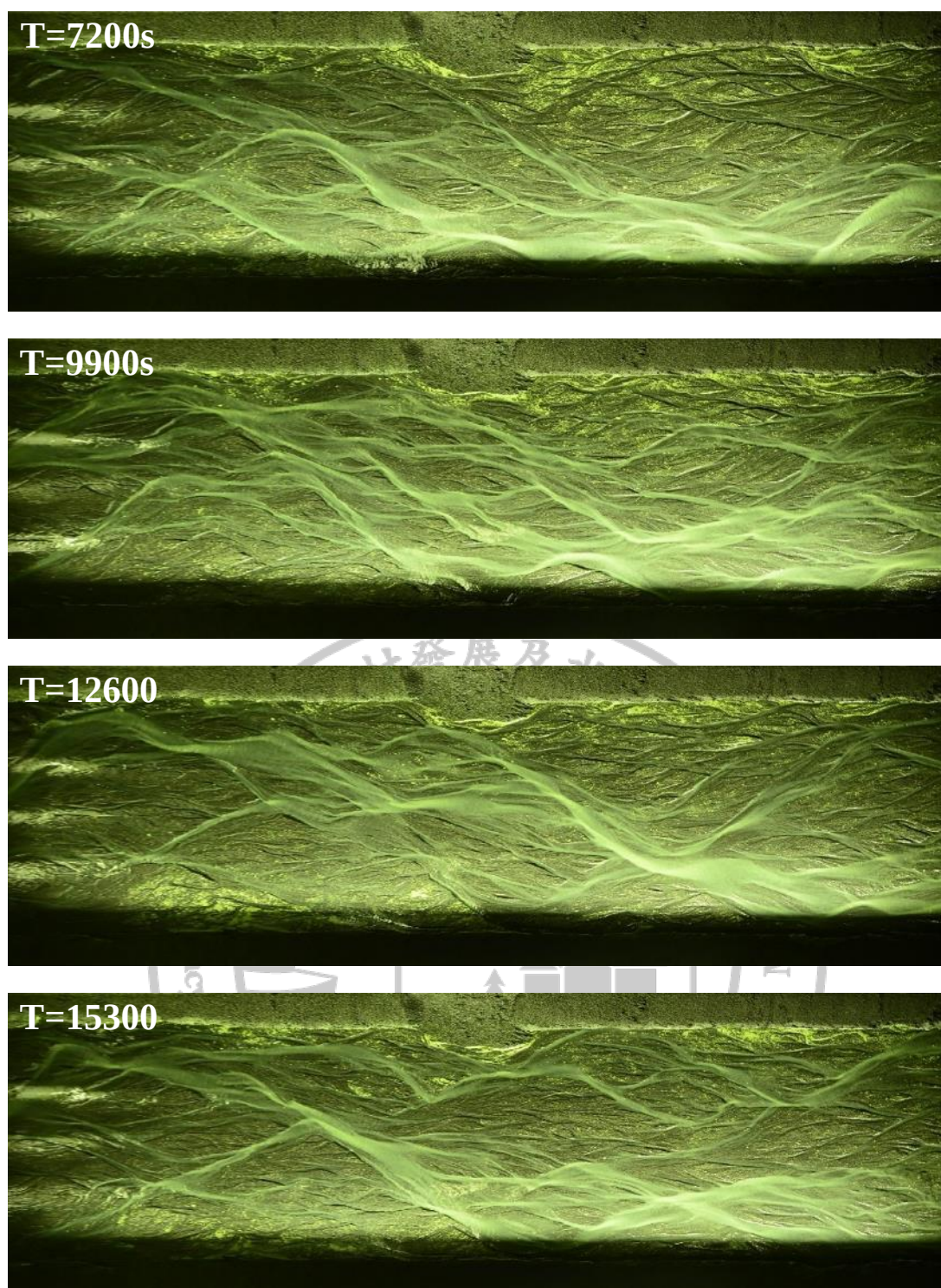


圖 4-21 A1 各時間點之正射影像圖(續)

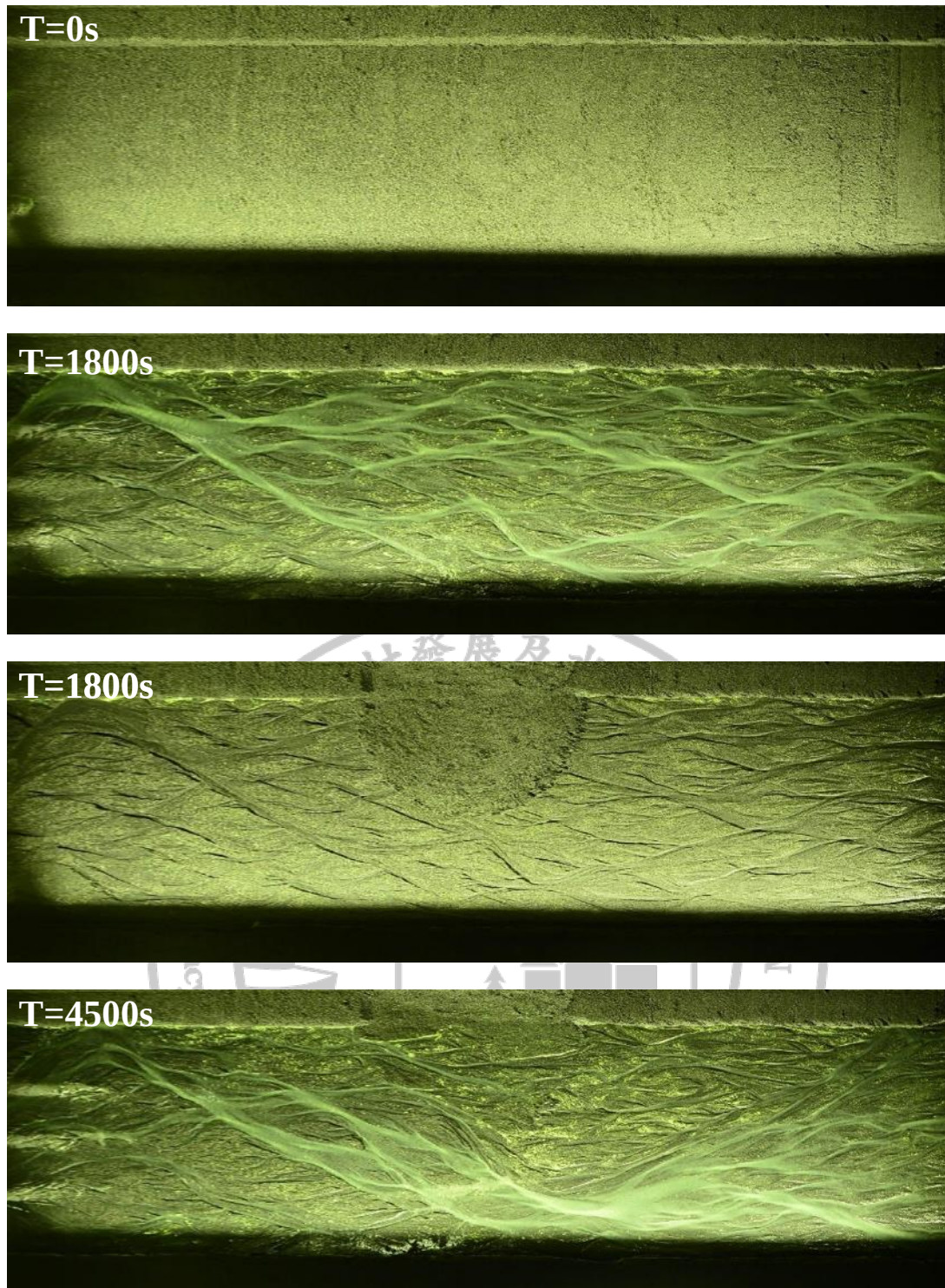


圖 4-22 A2 各時間點之正射影像圖

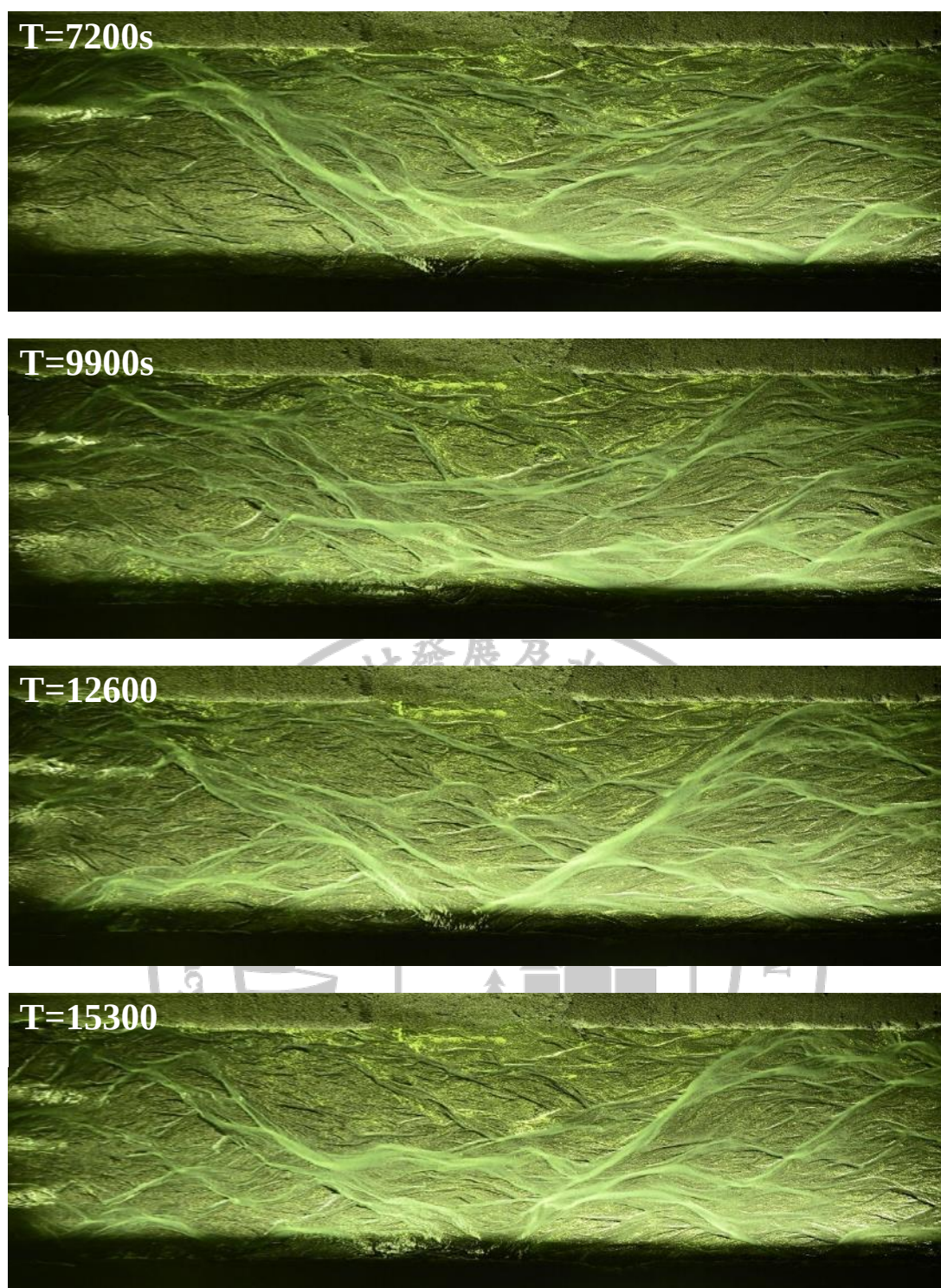


圖 4-23 A2 各時間點之正射影像圖(續)

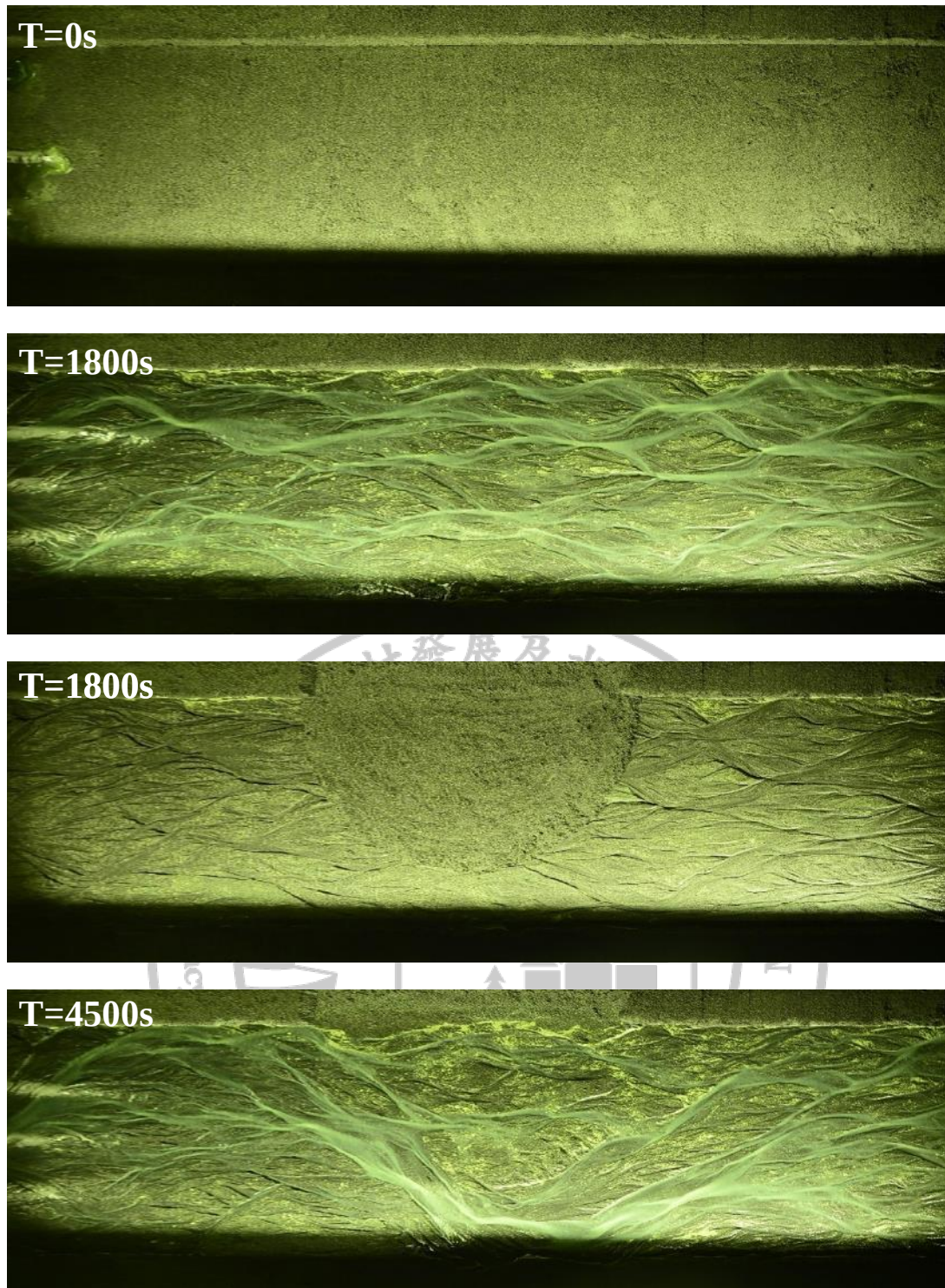


圖 4-24 A3 各時間點之正射影像圖

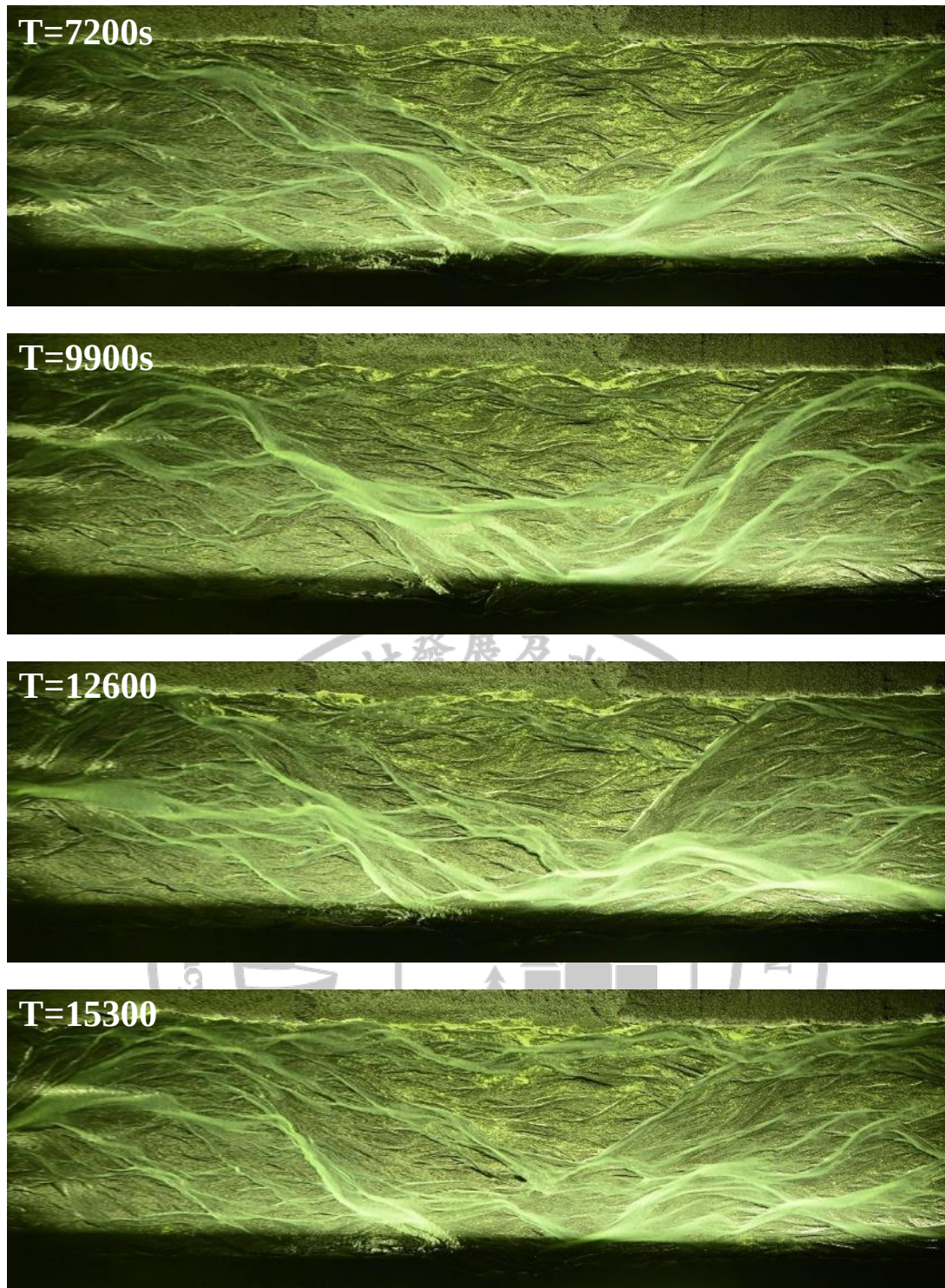


圖 4-25 A3 各時間點之正射影像圖(續)

圖 4-26 至圖 4-31 為實驗 B 系列之正射影像圖，3 組實驗與 A 系列相同，皆會在 1800 秒結束瓣狀發展階段，停水並分別鋪設半徑為 22 公分(B1)、44 公分(B2)及 66 公分(B3)的半圓形沖積扇於河段中心線左岸。B1(即圖 4-26 至圖 4-27)於 4500 秒時可以觀察到，相較於流量較小的 A1，B1 對於調適突然出現於河道內的側向沖積扇較為快速，流域縮減的幅度較小。也因為流量較大，水流較容易匯聚成主河道，故最終於 13500 秒時，水流匯聚成主河道於河道中右岸，而靠近左岸處仍有細小河道。

B2(即圖 4-28 至圖 4-29)與 A2 對於突然出現於河道內的側向沖積扇，調適所需的時間亦有所不同。於 9900 秒時，B2 的正射影像圖可以看出水流已將沖積扇消抹大半，並重新佔據其流域，並於 15300 秒時，實驗河道對於側向沖積扇已幾乎調適完成。

B3(即圖 4-30 至圖 4-31)與 A3 的實驗結果較為相同，水流於 4500 秒時因沖積扇的影響而於中右岸匯聚成主河道，並持續侵蝕右岸河灘地。在實驗最後 13500 秒時，水流亦無法擺盪回到中左岸，故側向沖積扇對於實驗段的影響仍然存在。

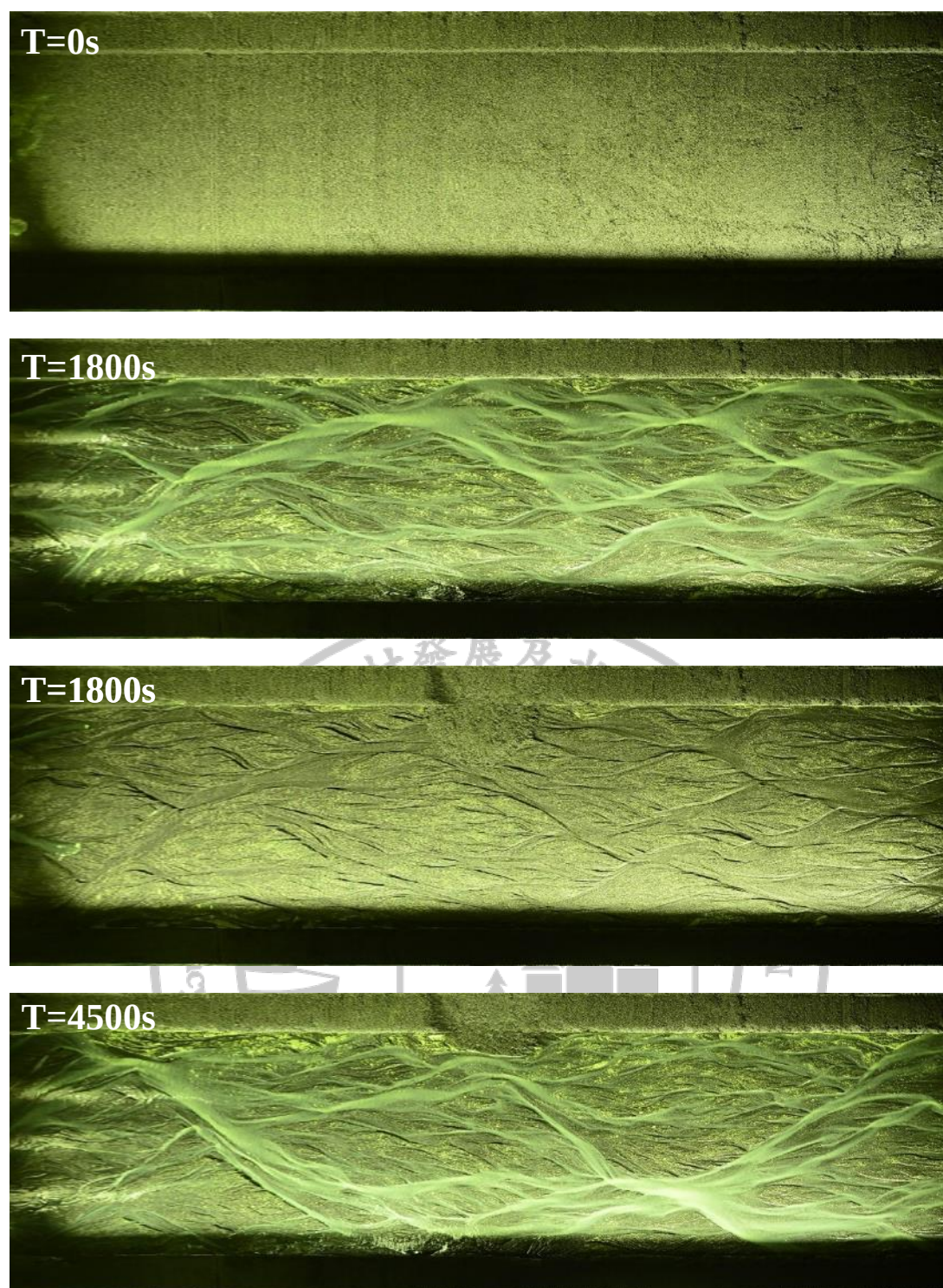


圖 4-26 B1 各時間點之正射影像圖

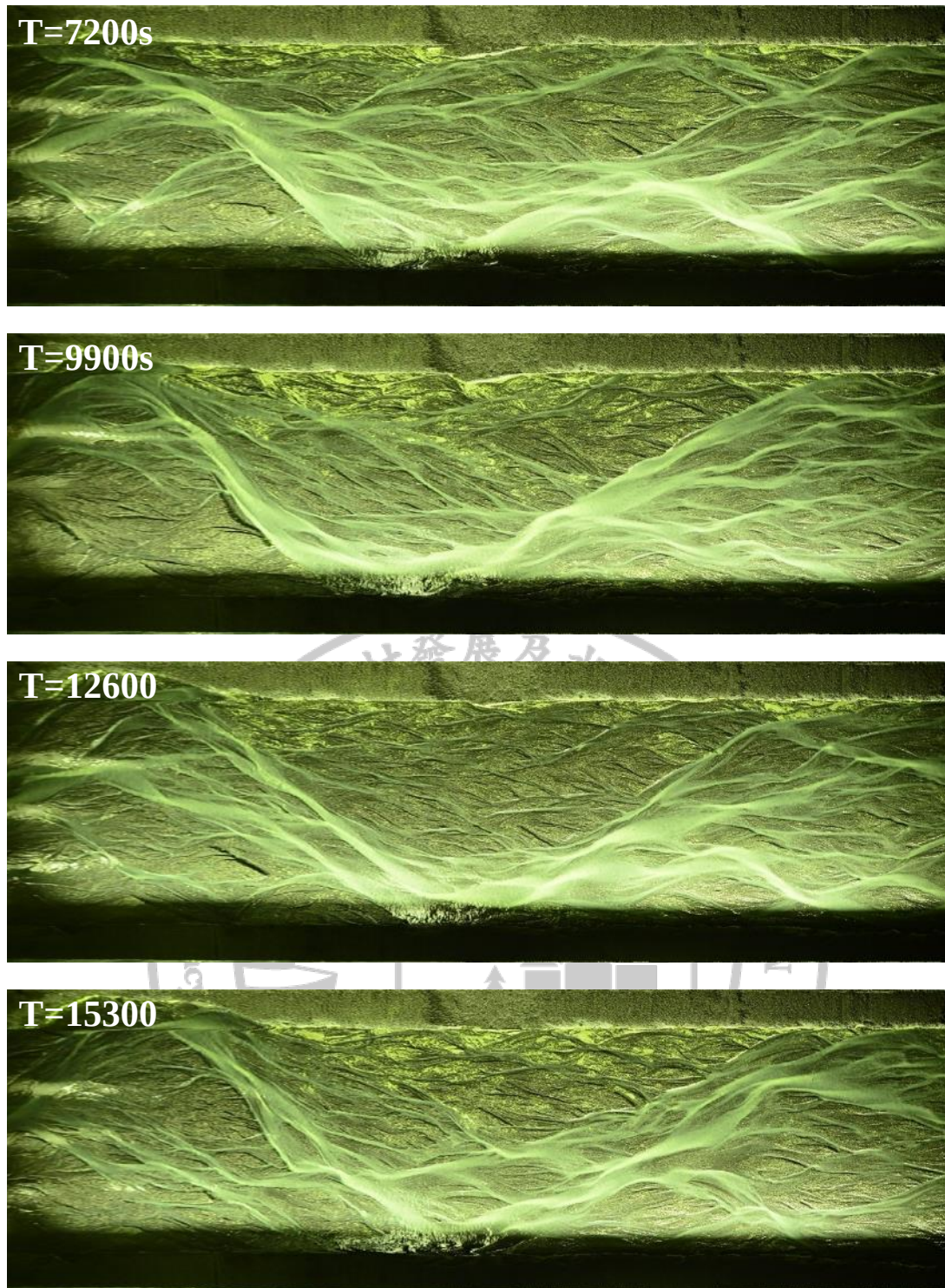


圖 4-27 B1 各時間點之正射影像圖(續)

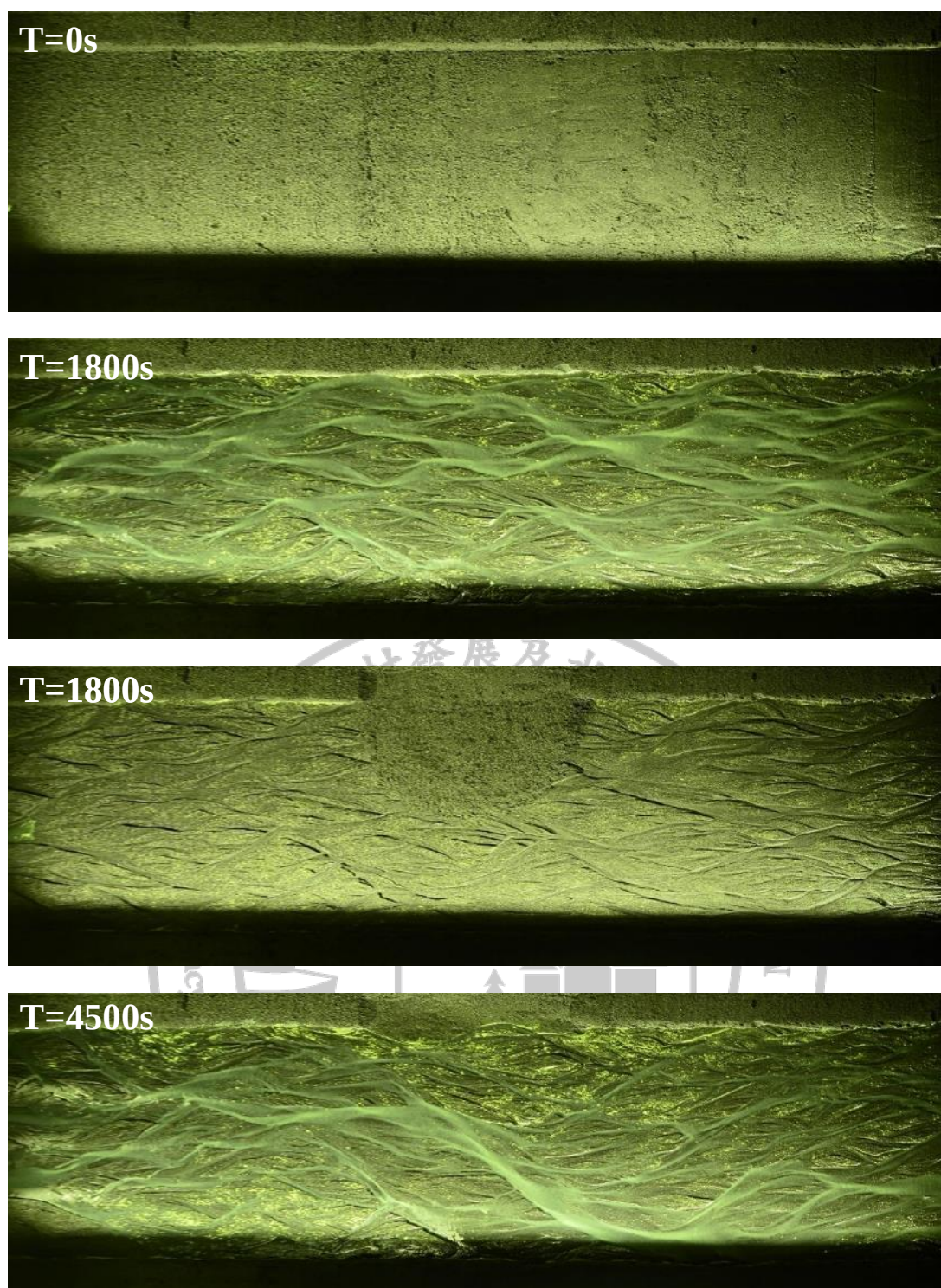


圖 4-28 B2 各時間點之正射影像圖

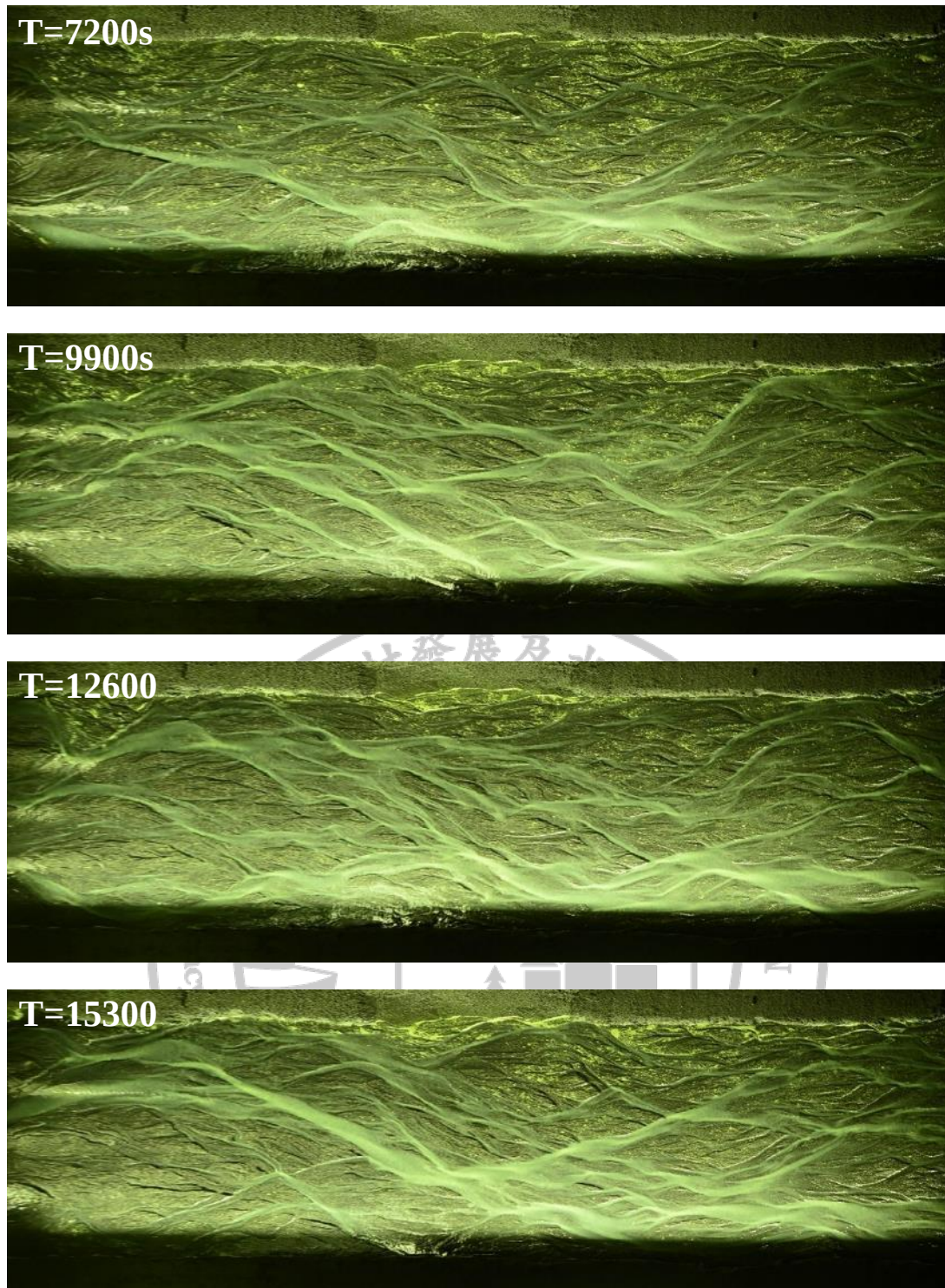


圖 4-29 B2 各時間點之正射影像圖(續)

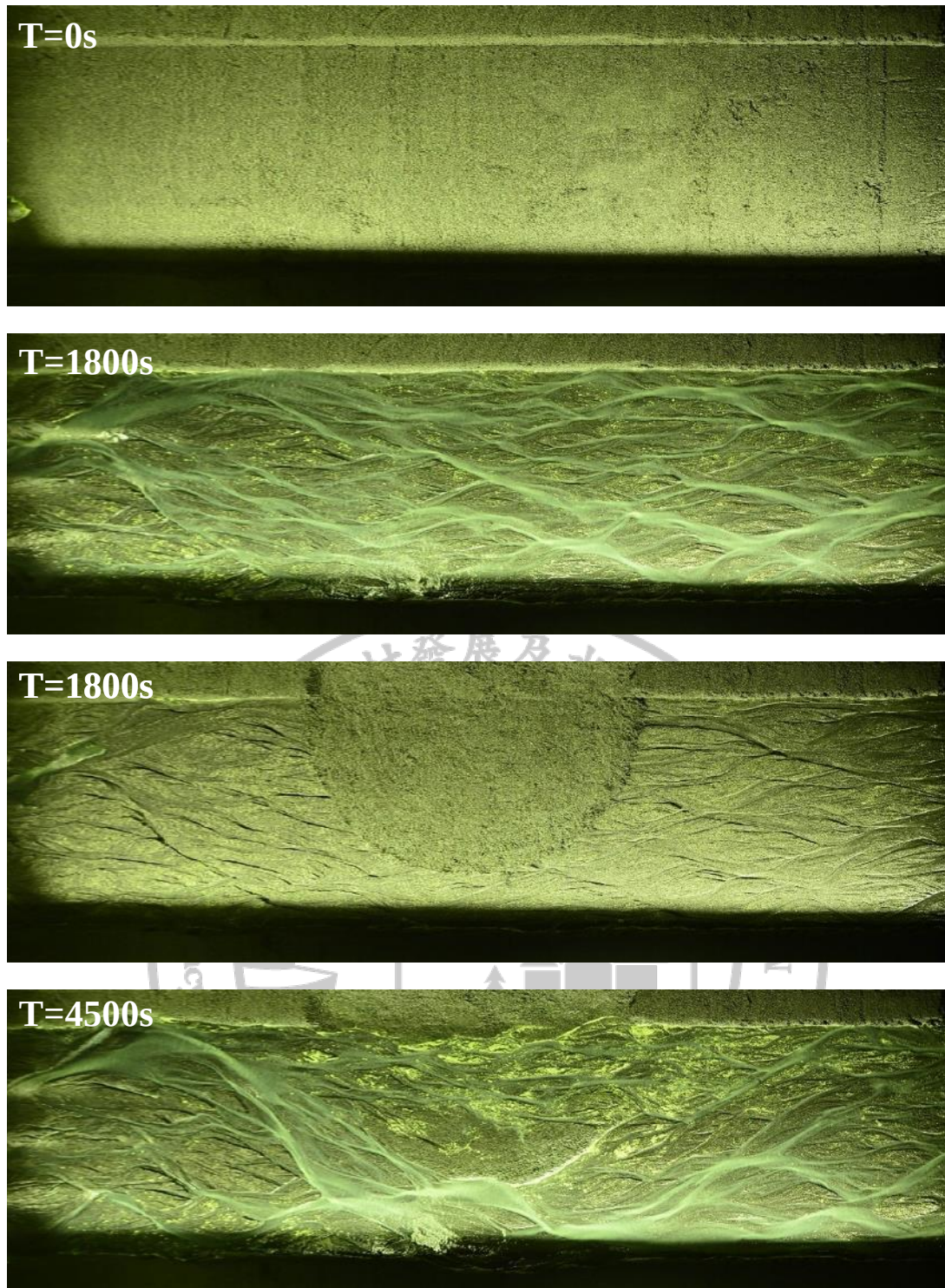


圖 4-30 B3 各時間點之正射影像圖

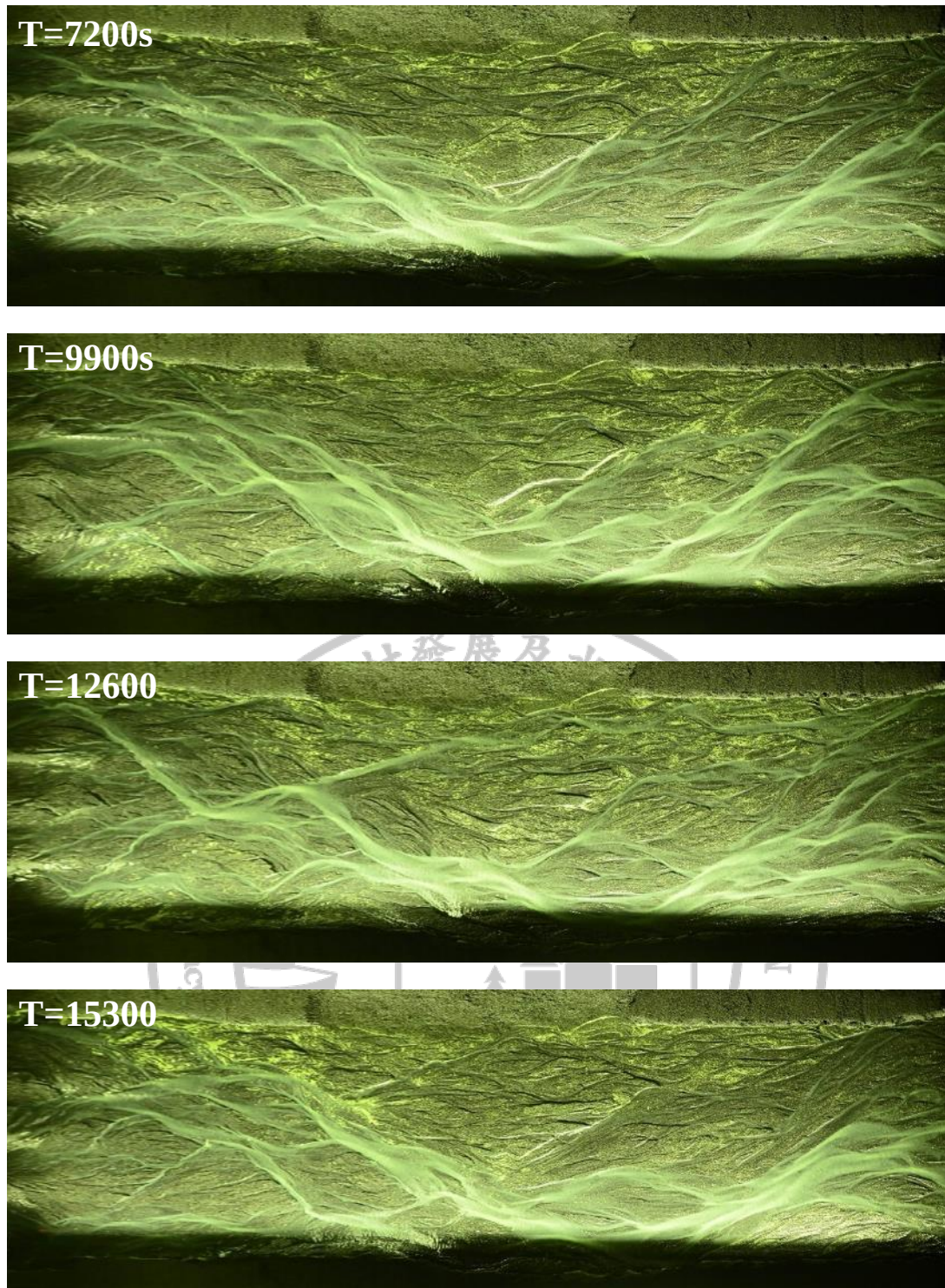


圖 4-31 B3 各時間點之正射影像圖(續)

2. 光源陰影圖

利用特定角度及亮度投射光線於地形上，光線及陰影得以突顯地形的高低起伏，如此之表現手法會使得掃描得到的地形資料在呈現效果上更貼近真實情況，可明顯看出河道和砂洲之相對分布位置(圖 4-32 至圖 4-37)。以下將分別展示 6 組實驗，以八個不同時間點展示。時間點 $T = 0$ 表示實驗尚未開始前的初始地形，而 $T = 1800$ 為辮狀發展階段結束的地形，而後出現的第二張 $T = 1800$ 則為鋪設完側向沖積扇後所掃描之地形。往後的五個時間點則分別為主實驗每階段結束後的掃描地形。



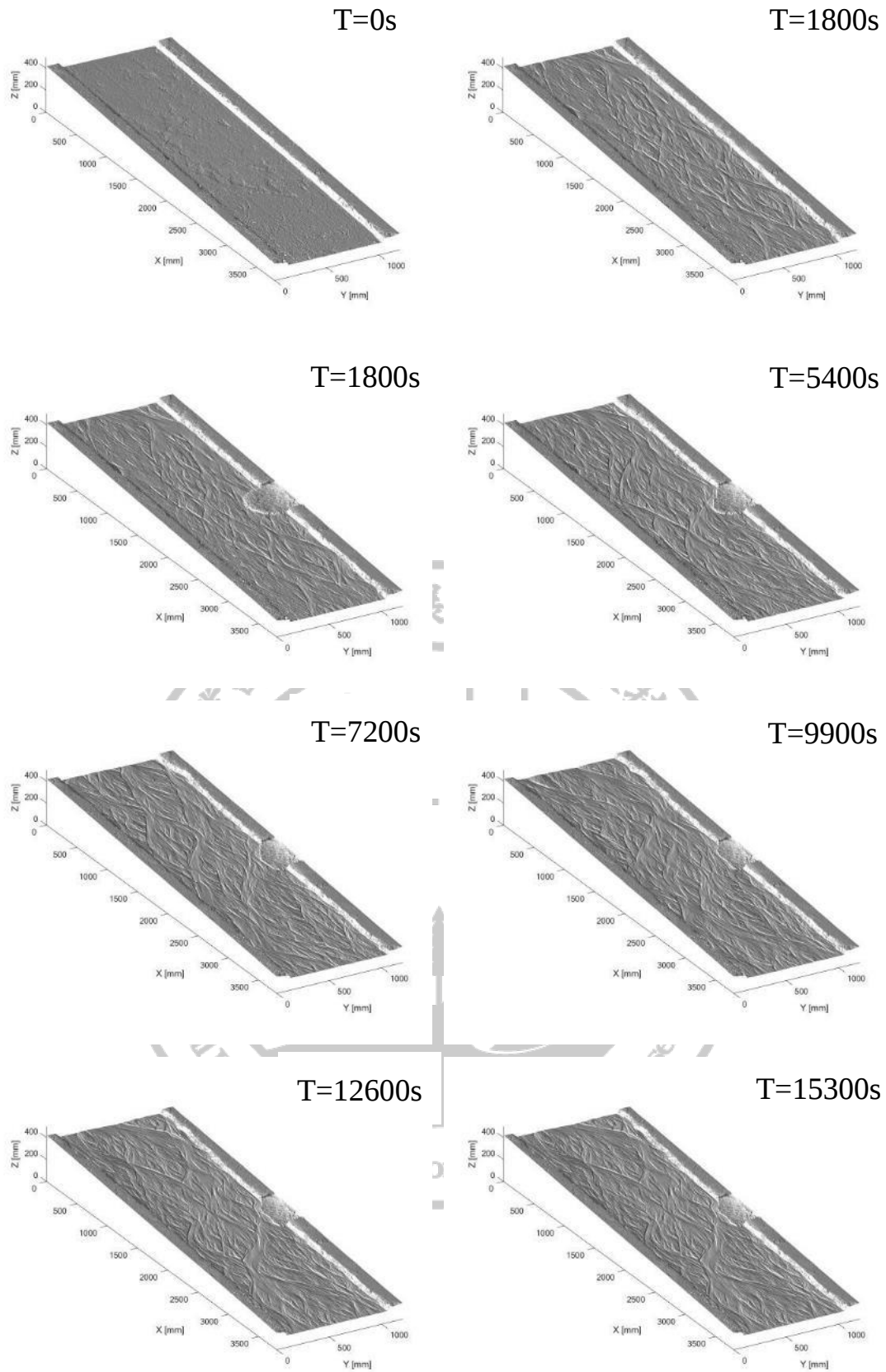


圖 4-32 A1 各時間點之光源陰影圖

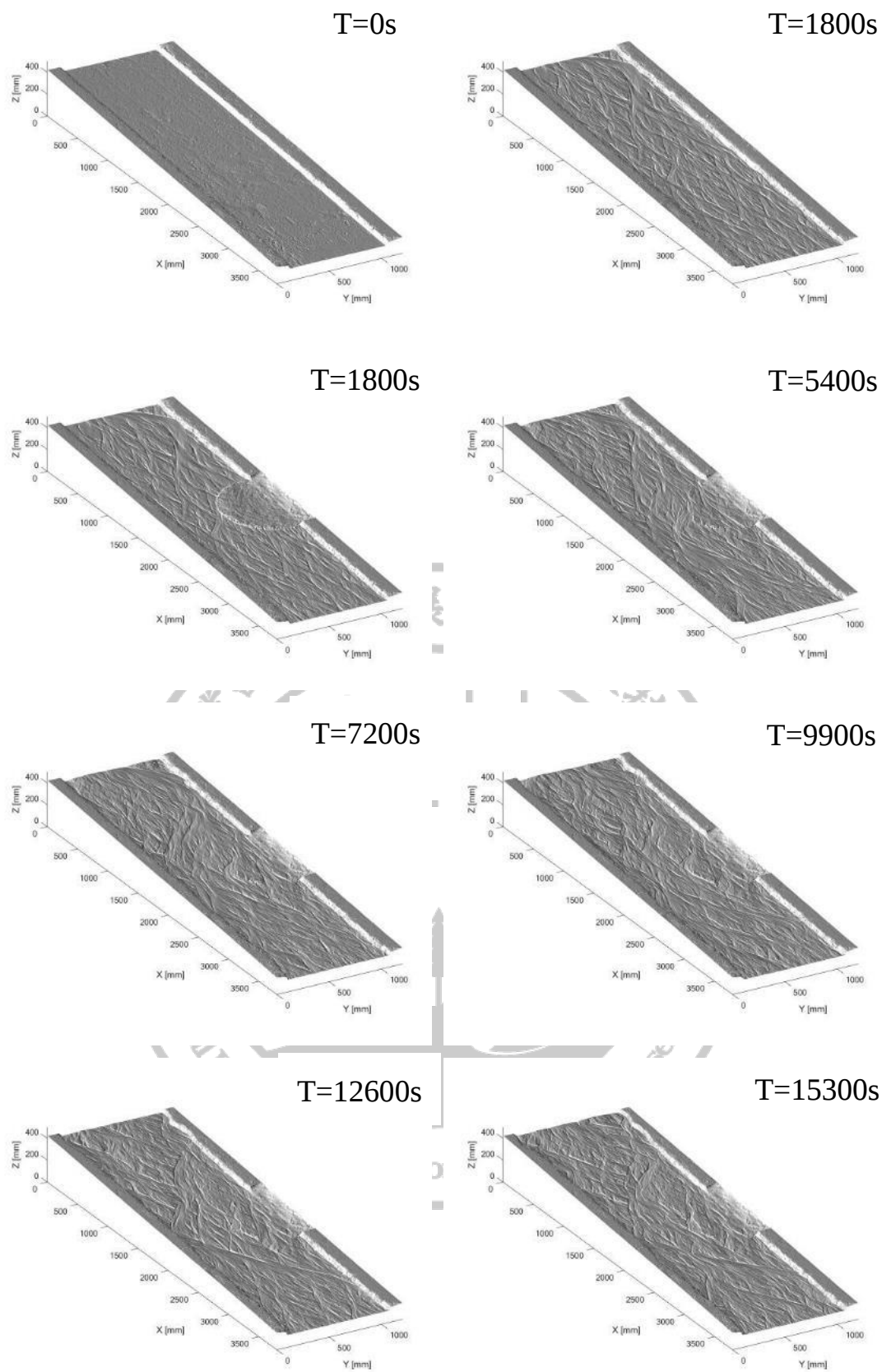


圖 4-33 A2 各時間點之光源陰影圖

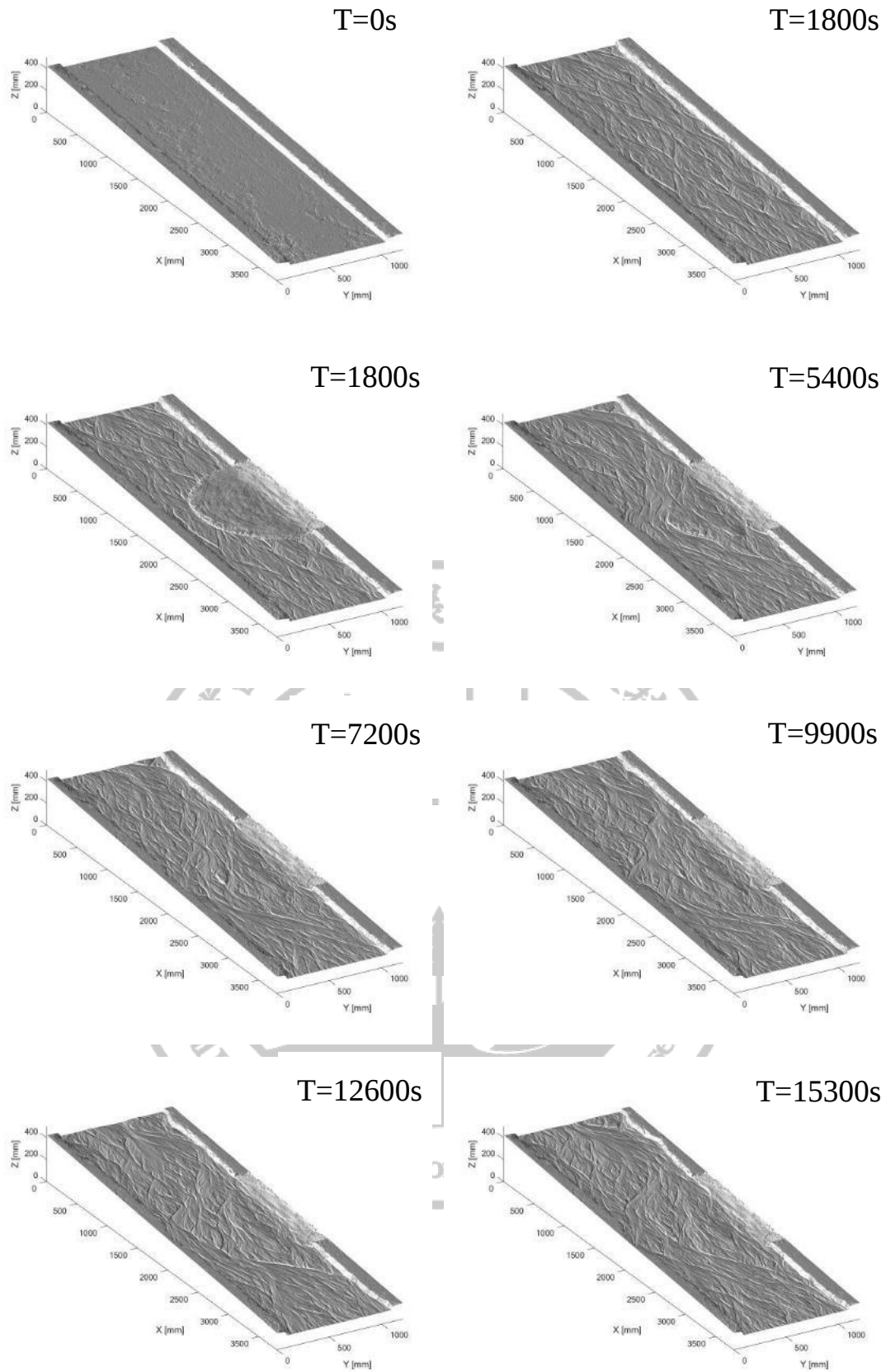


圖 4-34 A3 各時間點之光源陰影圖

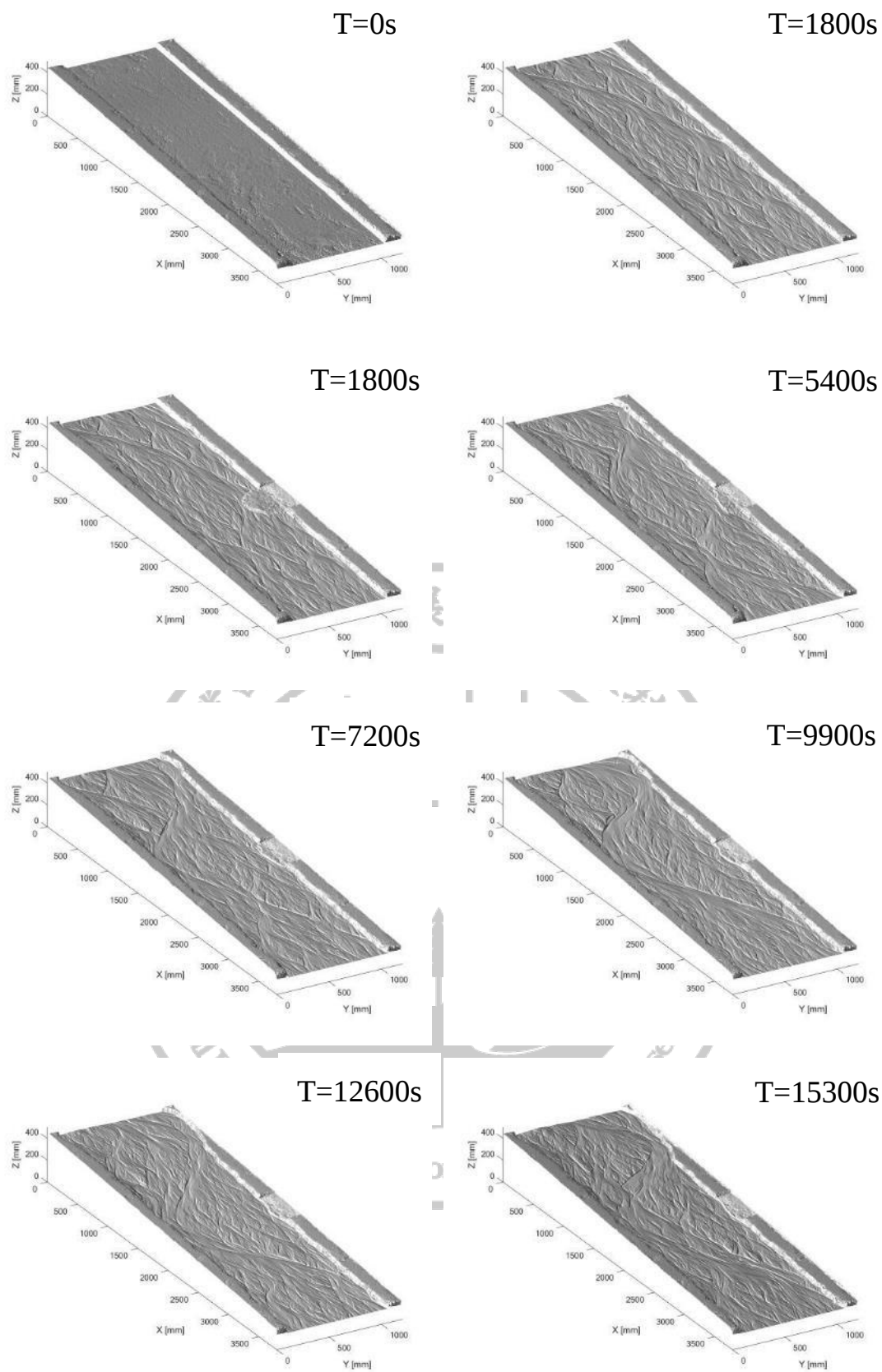


圖 4-35 B1 各時間點之光源陰影圖

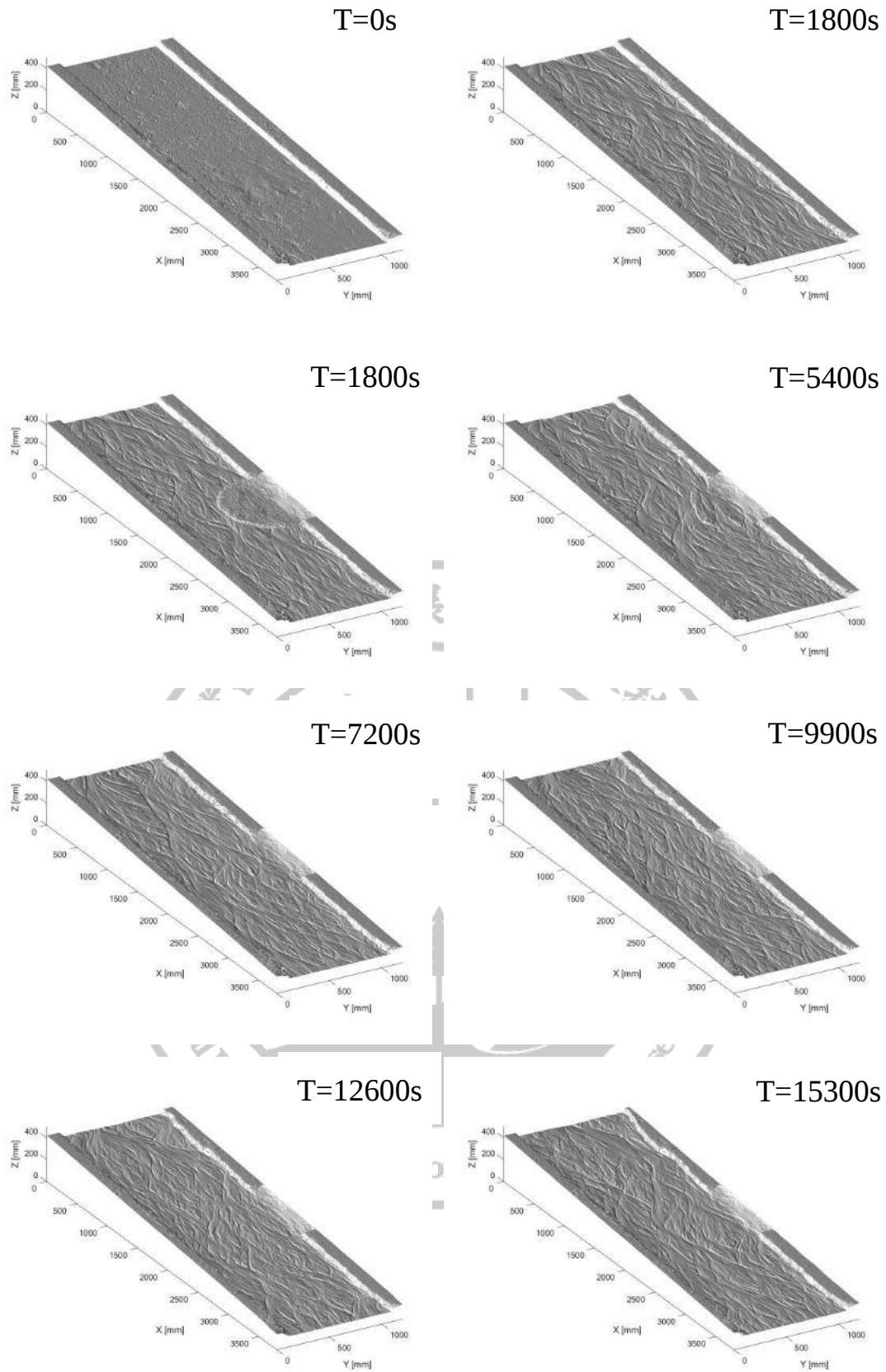


圖 4-36 B2 各時間點之光源陰影圖

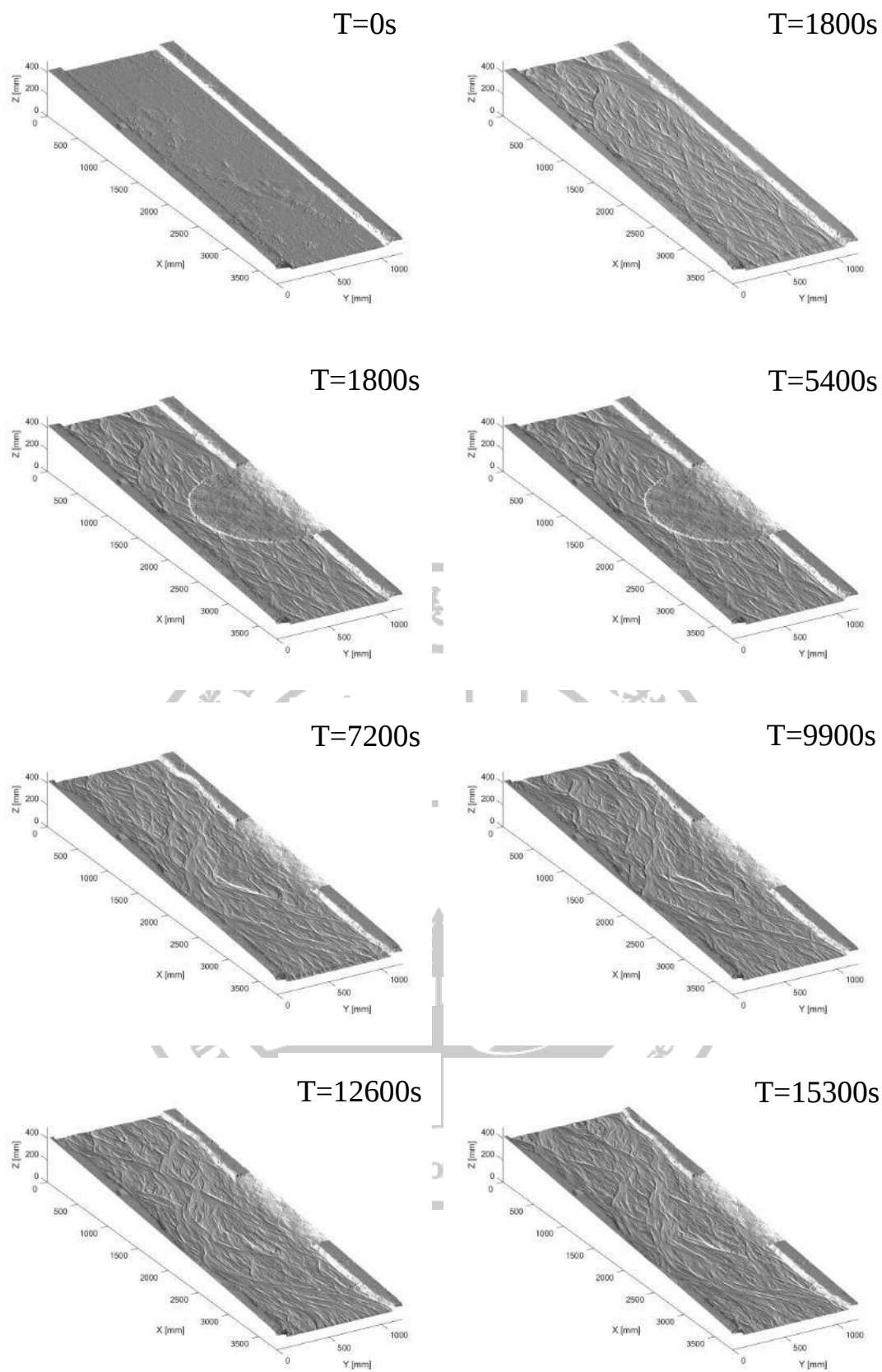


圖 4-37 B3 各時間點之光源陰影圖

3. 活躍辮狀指數

本計畫之實驗河段會在 1800 秒時因為突然出現的側向沖積扇導致河段地形改變，對原本的辮狀型態河道造成影響，進而影響活躍辮狀指數(active braided intensity, BI_A ，此後以 BI_A 來表示)。本計畫將河道長度設為 x 軸，利用前述的辮狀指數自動化分析，於實驗段 $x = 200\text{mm}$ 至 $x = 3600\text{mm}$ ，每 50 mm 做一截面，而後計算每截面的河道數量，而後加總並平均得到該時間點之 BI_A ，最終在圖 4-38 中為每 60 秒一筆資料表現。

每個 BI_A 的資料點意義為當下時間點實驗段全河道截面所計算的河道數量平均，誤差則為同一時間在不同斷面的 BI_A 變化。而在圖表中，時間點 1800 秒、4500 秒、7200 秒、9900 秒及 12600 秒都有在圖表上使用直線來區分階段，並在每階段中與 x 軸平行之黑線為該階段內 BI_A 的平均值。另外，資料點的顏色在每階段亦會不同，如圖 4-38 所示。

此六組時間對 BI_A 之圖表可看出不論水砂比是 60 或 90， BI_A 在實驗區域加入側向沖積扇後(即 1800 秒後)，除了 A1、A2 及 B1 之外都會受到影響，且沖積扇半徑越大影響 BI_A 則越顯著下降。但 BI_A 在 1800 秒處下降後，會隨時間緩慢回升。是因為隨著時間推進，側向沖積扇對主河道的影響會逐漸遞減，使 BI_A 回升。而 A1、A2 及 B1 沒有 BIA

下降並回升的趨勢，A1 及 B1 是因鋪設的側向沖積扇半徑為 22 公分，對於主河道的影響較小，故對於 BI_A 的影響較小，兩組實驗的 BI_A 在主實驗階段都保持穩定。而 A2 於主實驗第一階段(即 1800 秒至 4500 秒)可以觀察到 BI_A 因為側向沖積扇的影響而下降，但因 A 系列的水砂比較小，即代表其流量較小，故對於側向沖積扇的調適較慢，使 BI_A 回升效果並不顯著。



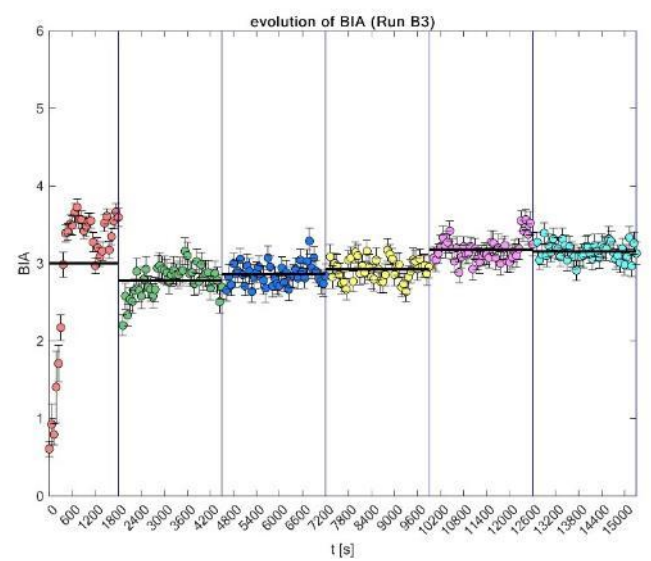
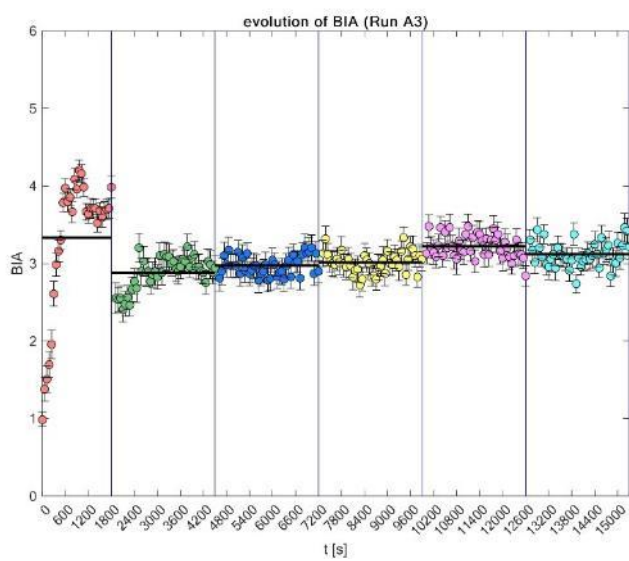
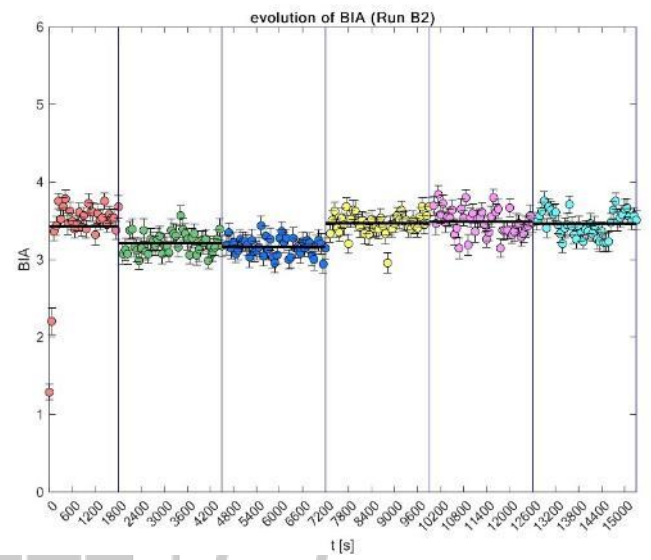
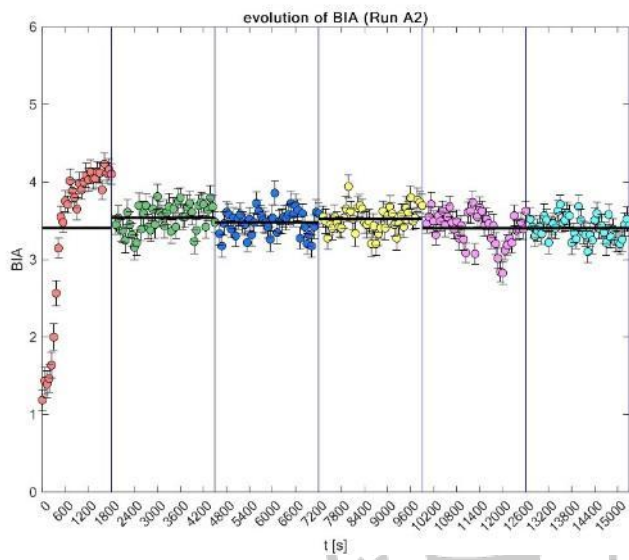
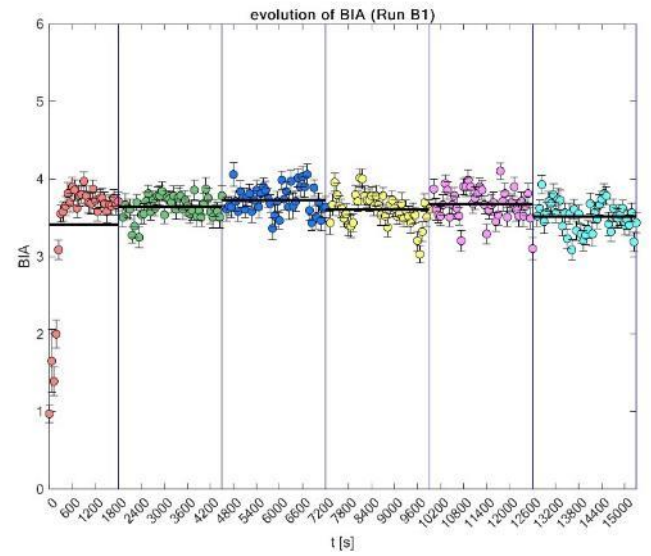
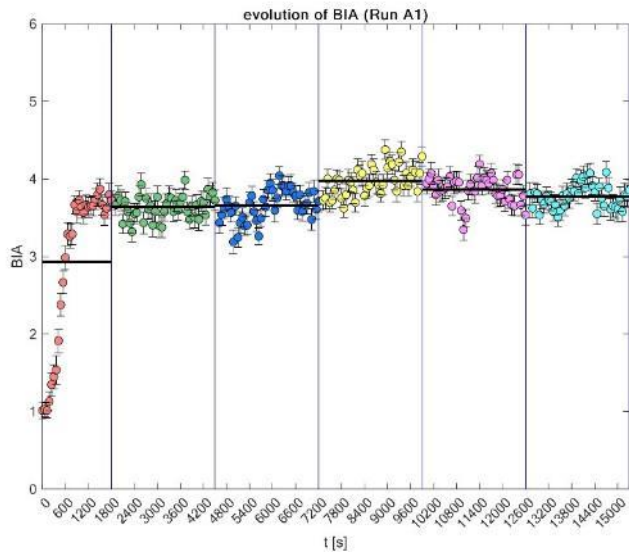


圖 4-38 A 系列及 B 系列之活躍辦狀指數隨時間的變化

4. 砂洲形貌

在辮狀河道形貌分析中，除了觀察與河道數量相關聯的 BI_A ，砂洲也時刻因水流的侵蝕堆積而改變其樣貌。為了能量化砂洲形貌進而討論，本計畫使用長寬比與緊緻度描述砂洲形貌變化。利用前文所述之自動化辨識沙洲技術來進行影像分析，計算每 5 秒一張的正射影像圖中砂洲的長寬比及緊緻度，並將同一時間點之長寬比與緊緻度做平均，設為縱軸，而時間則為橫軸，以此作圖檢視長寬比隨時間的變化(圖 4-39)及緊緻度隨時間的變化(圖 4-40)。發現本計畫共 6 組實驗之長寬比及緊緻度皆大致保持穩定，不會隨時間變化。



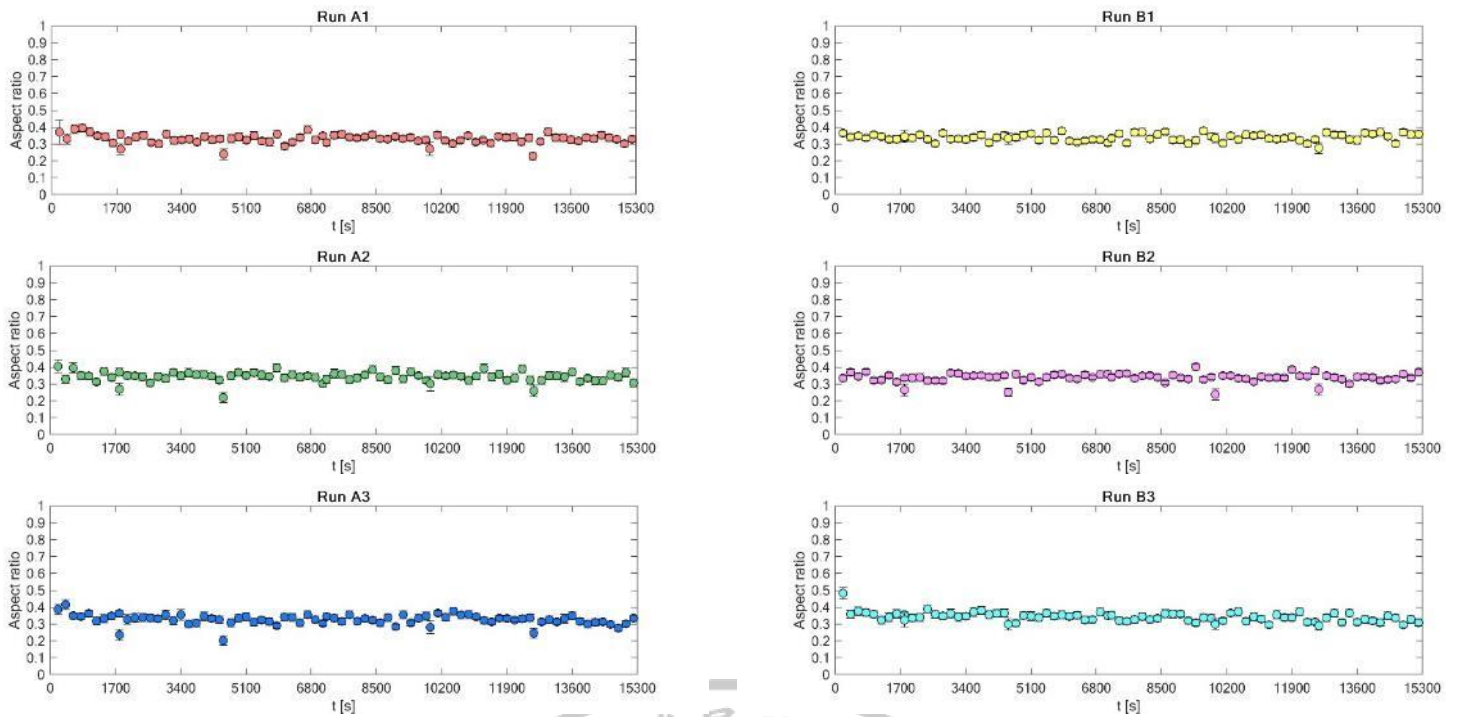


圖 4-39 A 系列及 B 系列之砂洲長寬比隨時間的變化

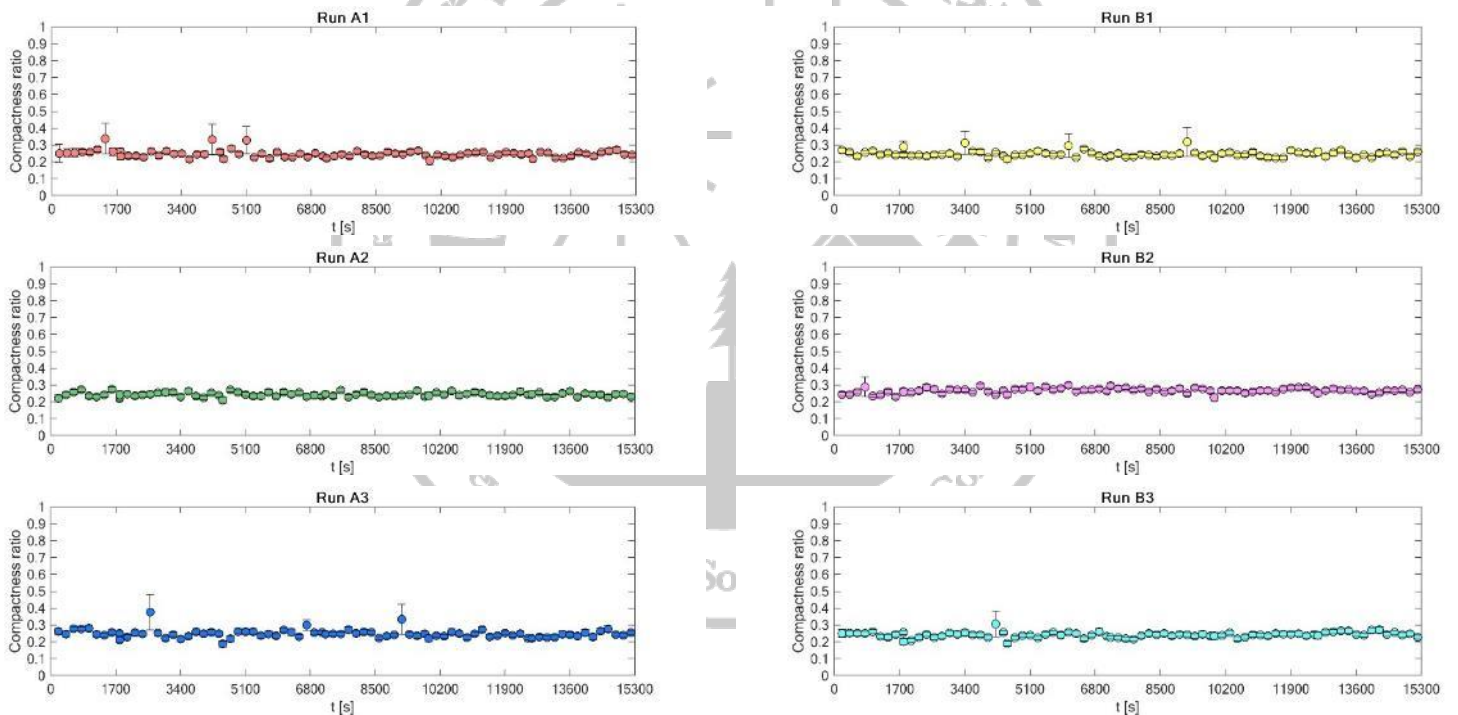
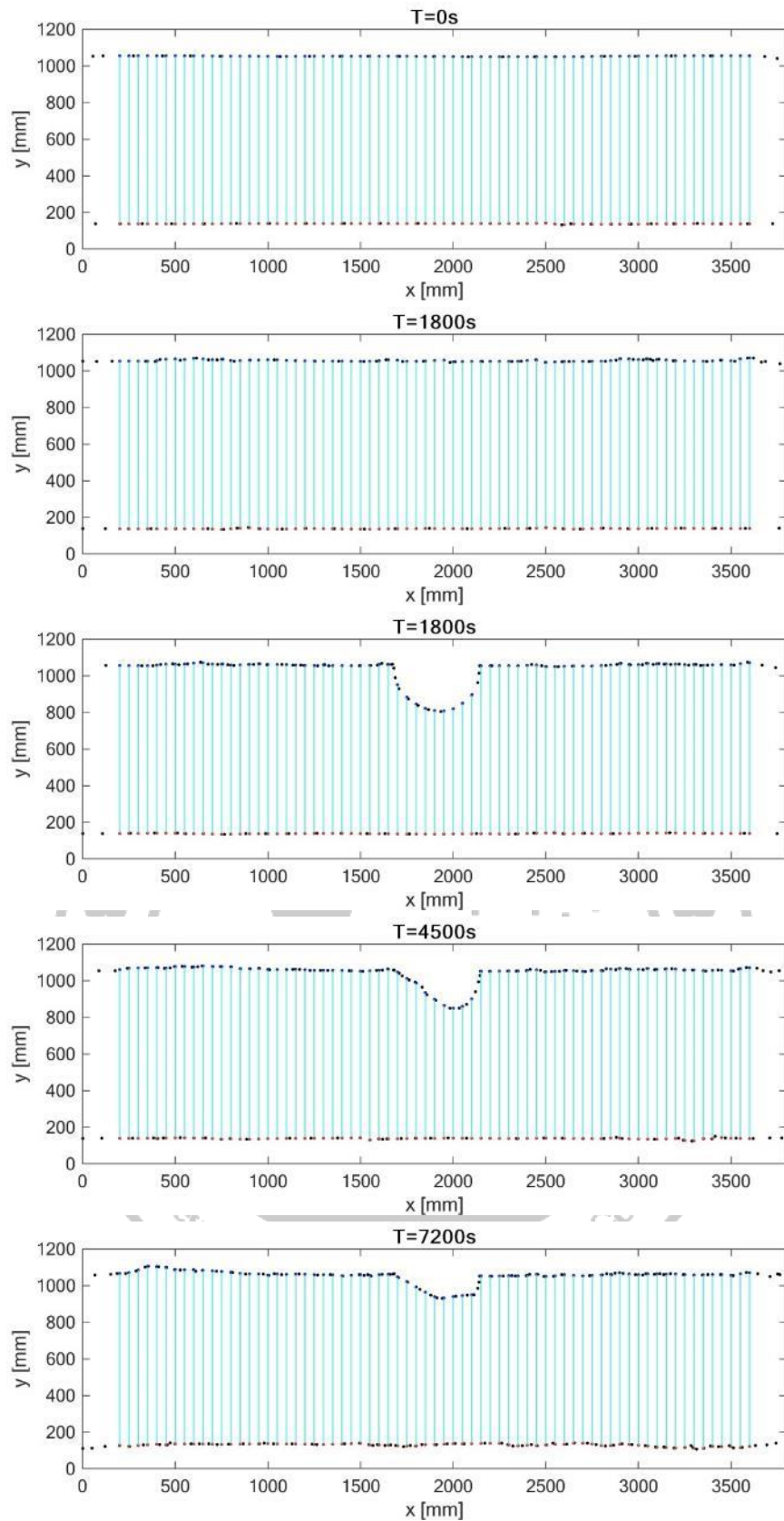


圖 4-40 A 系列及 B 系列之砂洲緊緻度隨時間的變化

5. 河寬變化

瓣狀型態河川有擺盪的特性，會在實驗時間內持續改變河床及兩岸河灘地之地貌。本計畫利用 MATLAB 圈選每階段結束後之數值地形上之河道範圍，取實驗段 $x = 200\text{mm}$ 至 $x = 3600\text{mm}$ ，每 50mm 計算一河寬，便可取得隨時間的河寬變化(圖 4-41 至圖 4-52)。

於各實驗的河寬隨時間演化圖可以發現，相同的側向沖積扇半徑表現了相似的演化結果，且流量較大的 B 系列拓寬程度都較 A 系列大。在 A1 及 B1 的河寬演化圖中可以發現因沖積扇影響而拓寬的右岸位置皆在實驗段下游處 $x = 3000\text{mm}$ 至 3800mm (圖 4-42 與圖 4-48)，A2 及 B2 因沖積扇影響而拓寬的右岸位置往上游遷移至 $x = 2500\text{mm}$ - 3000mm (圖 4-44 與圖 4-50)，而 A3 及 B3 因沖積扇影響而拓寬的右岸位置往上遷移至 $x = 2000\text{mm}$ - 2500mm (圖 4-46 與圖 4-52)。在相同的左側側向沖積扇半徑下，河寬演化圖展現了相似的結果，並且隨著側向沖積扇半徑增大，右岸的拓寬位置隨之往上游移動。



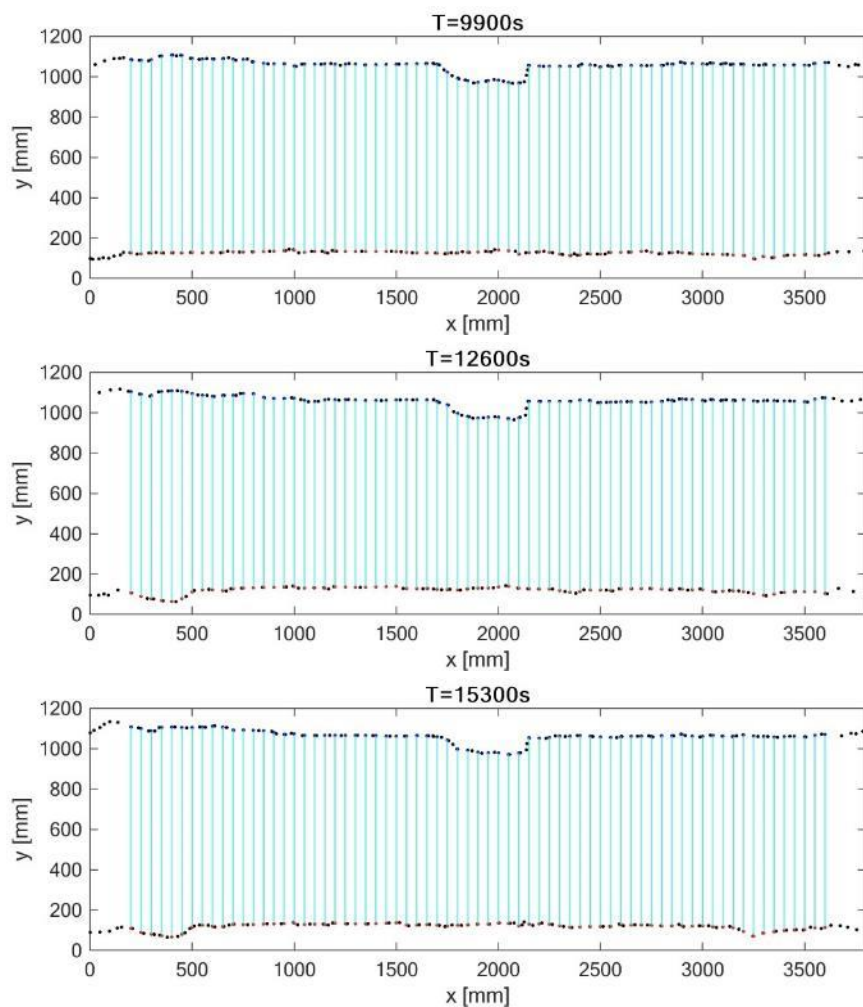


圖 4-41 A1 實驗之河寬隨時間的變化

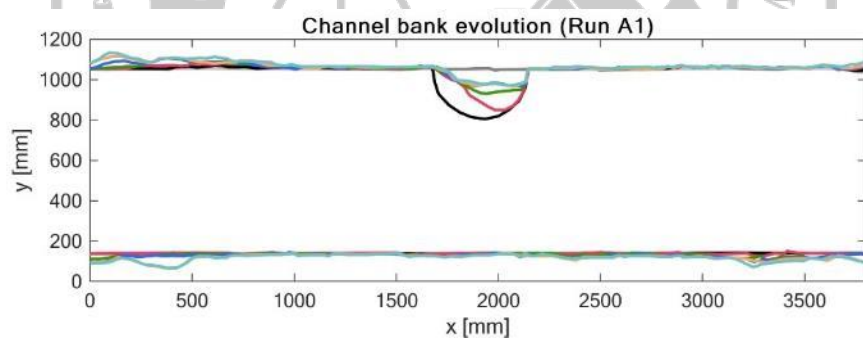
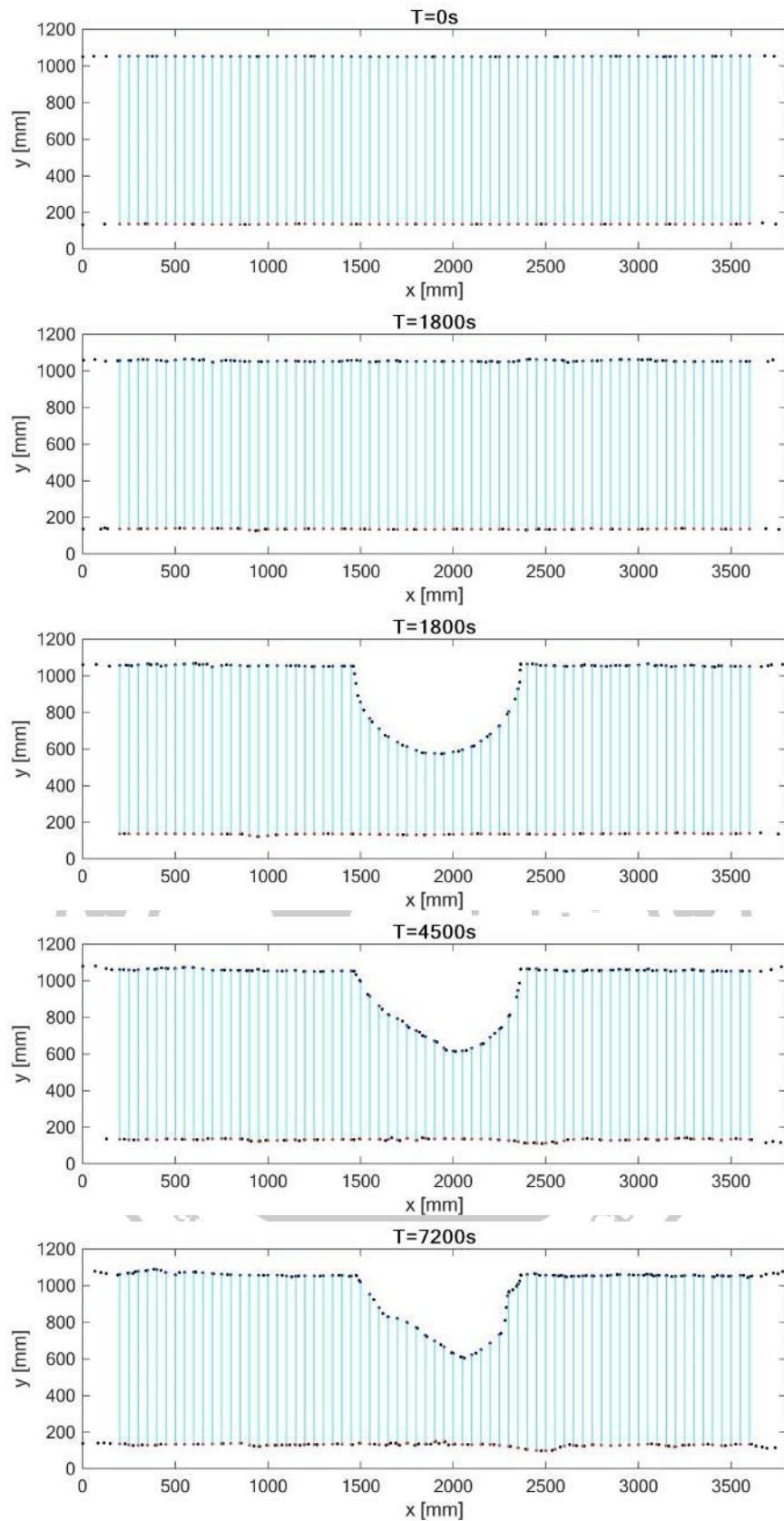


圖 4-42 A1 實驗之河寬隨時間演化圖



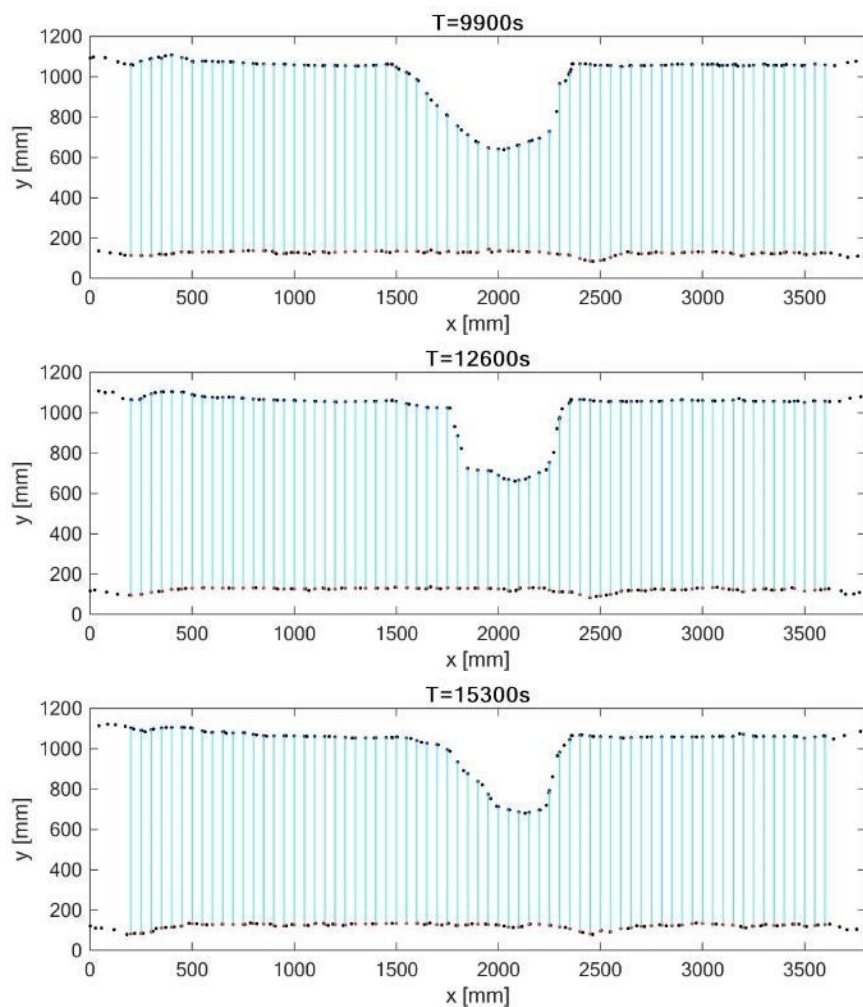


圖 4-43 A2 實驗之河寬隨時間的變化

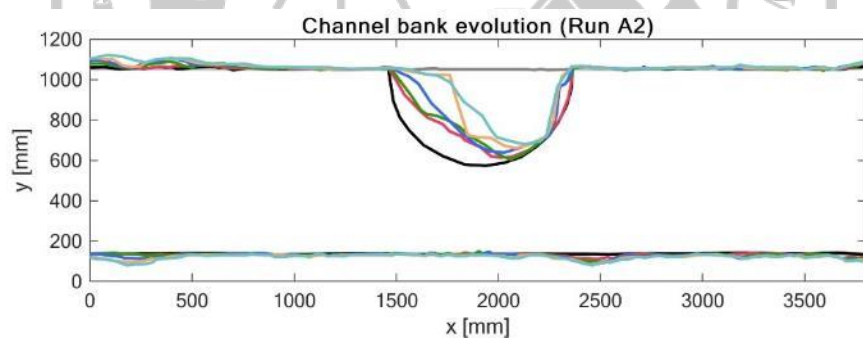
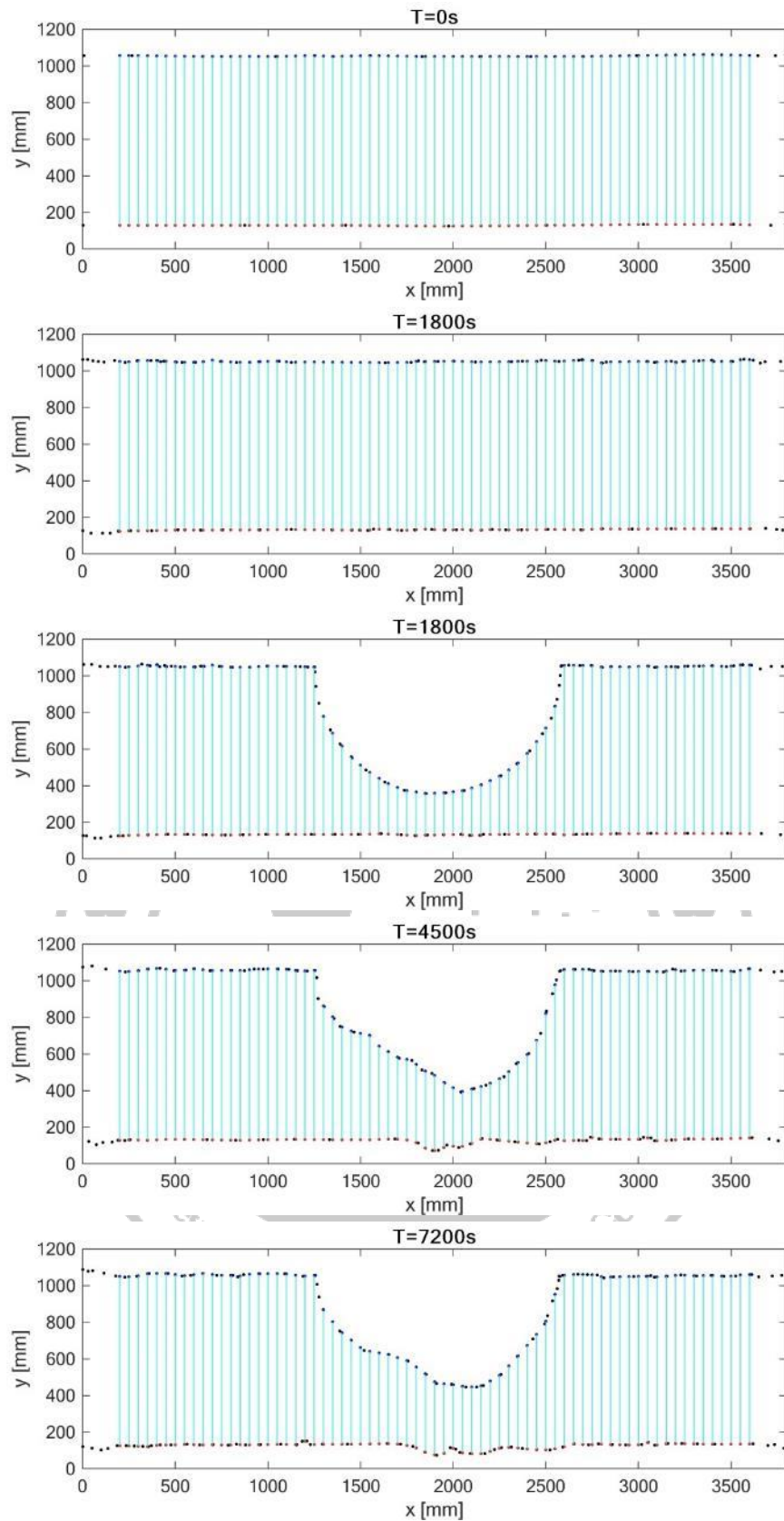


圖 4-44 A2 實驗之河寬隨時間演化圖



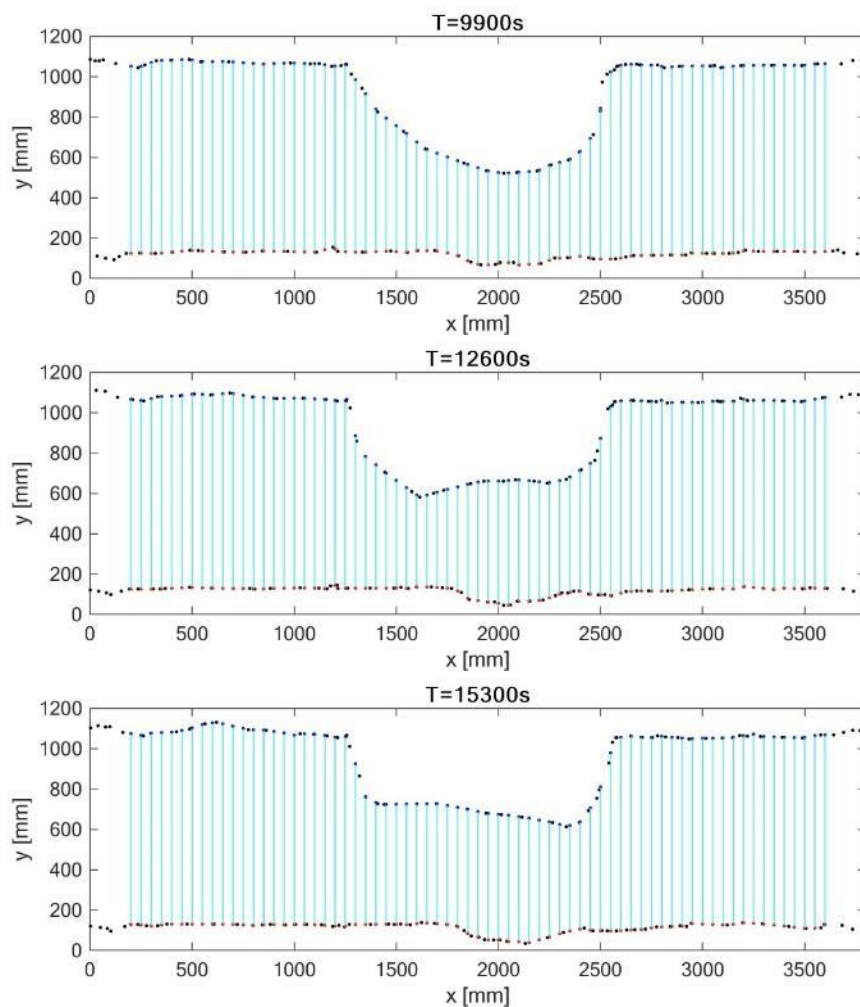


圖 4-45 A3 實驗之河寬隨時間的變化

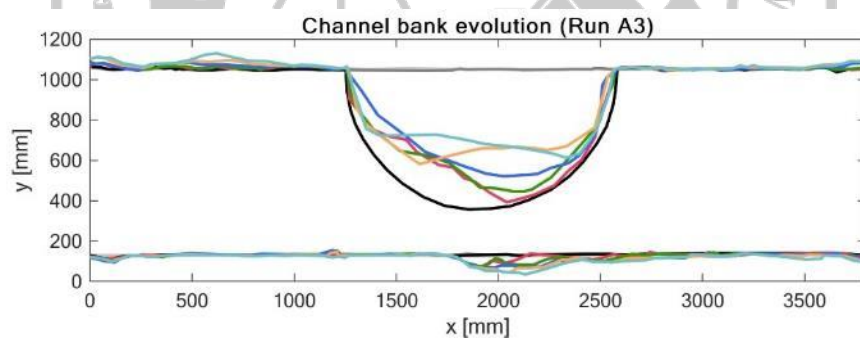
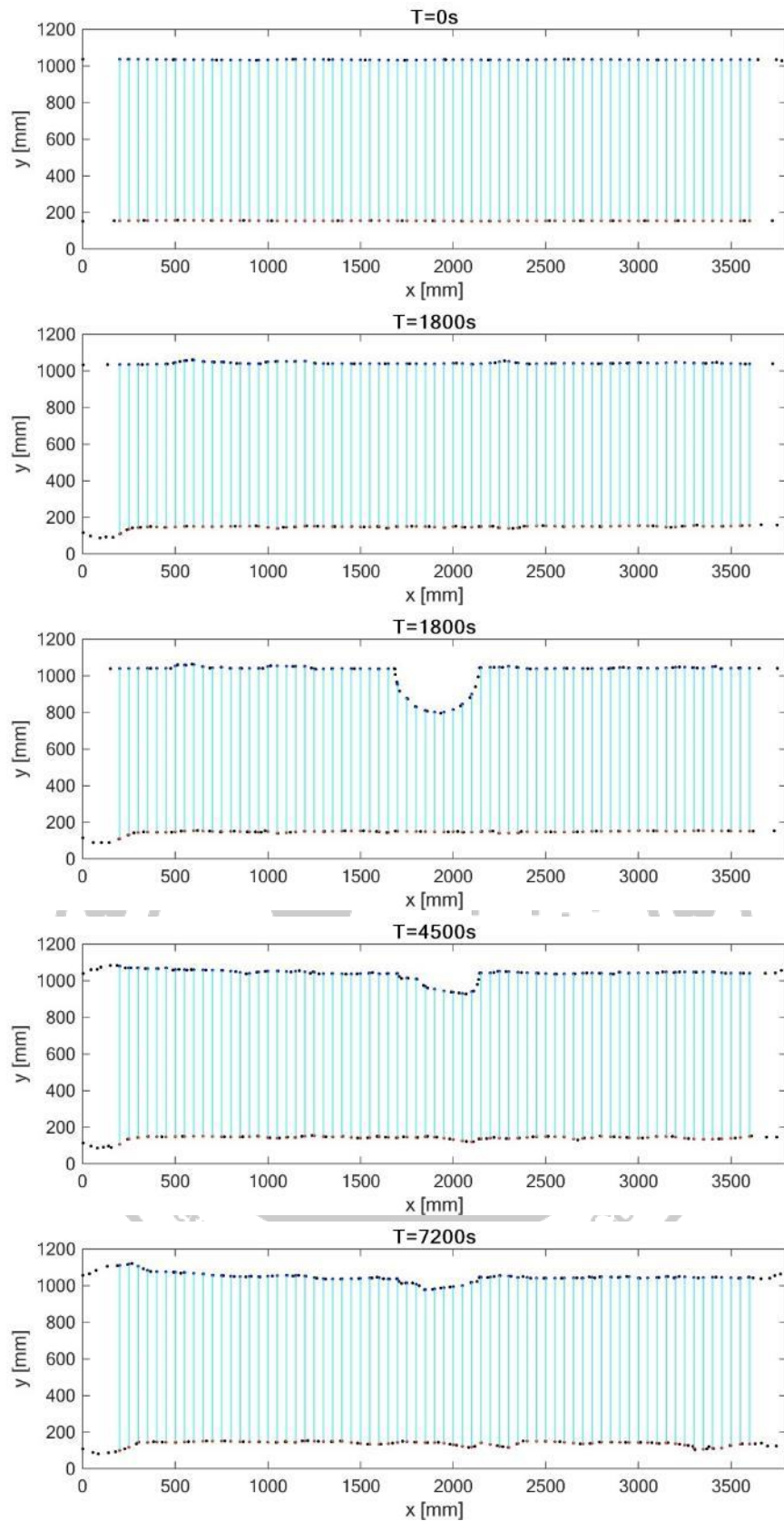


圖 4-46 A3 實驗之河寬隨時間演化圖



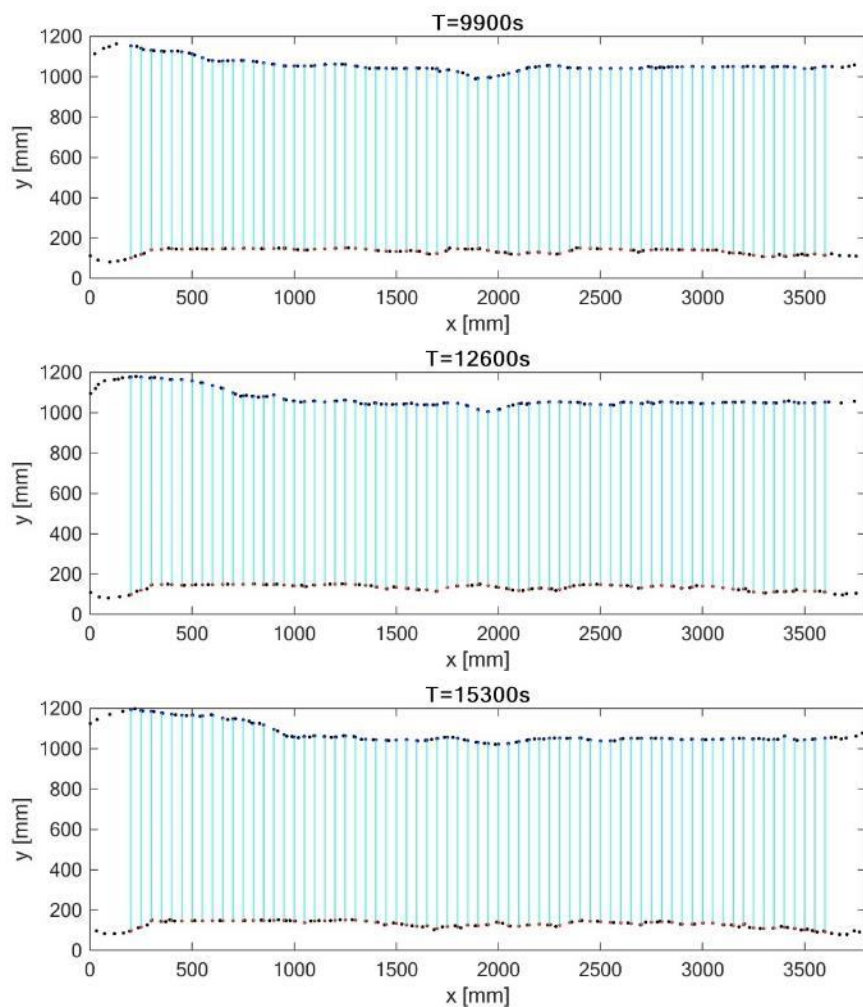


圖 4-47 B1 實驗之河寬隨時間的變化

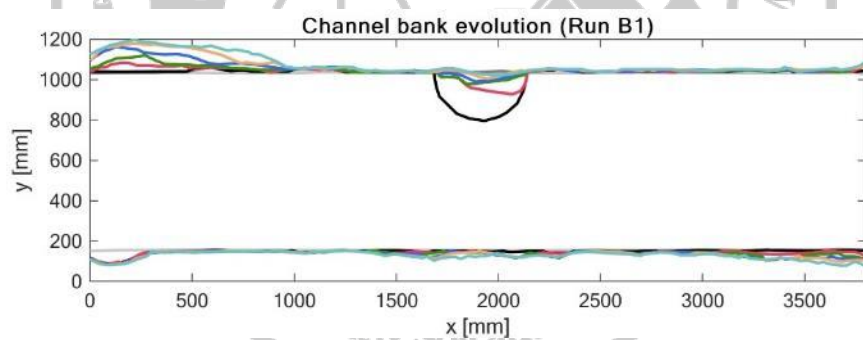
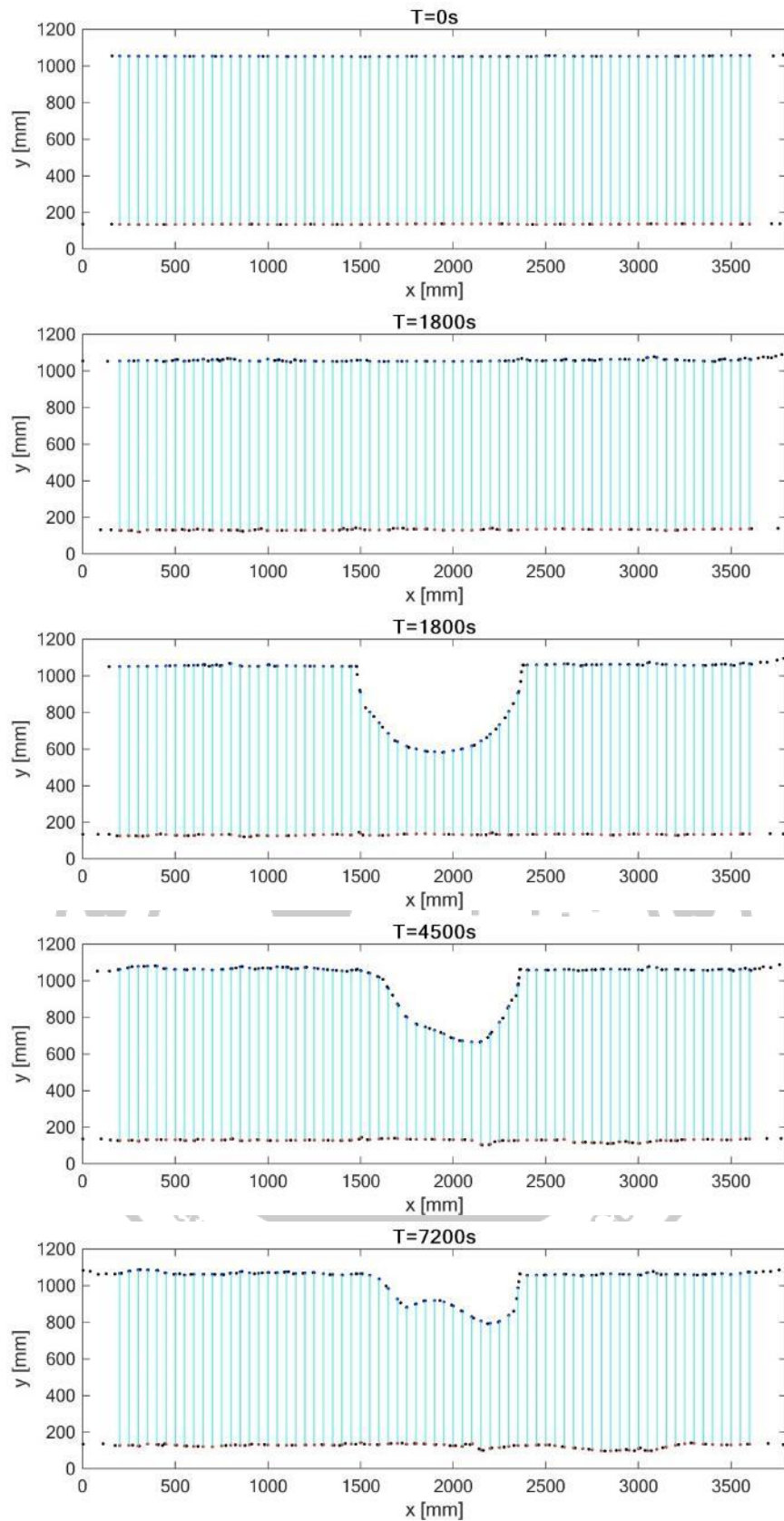


圖 4-48 B1 實驗之河寬隨時間演化圖



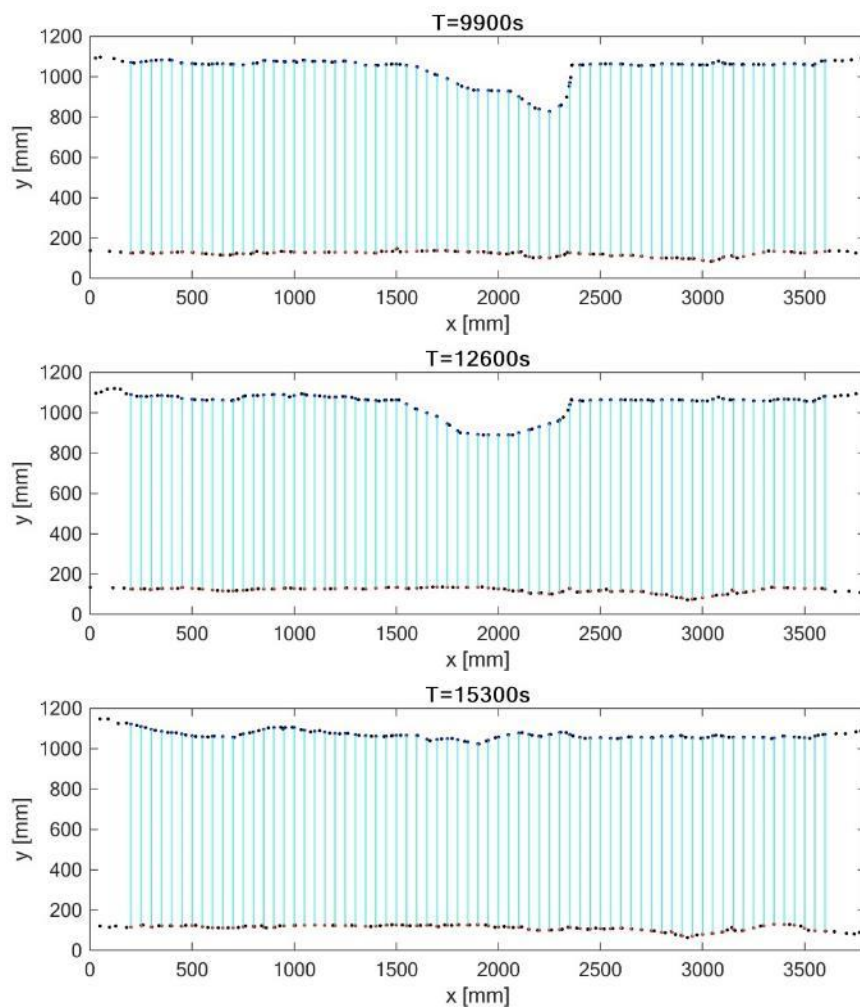


圖 4-49 B2 實驗之河寬隨時間的變化

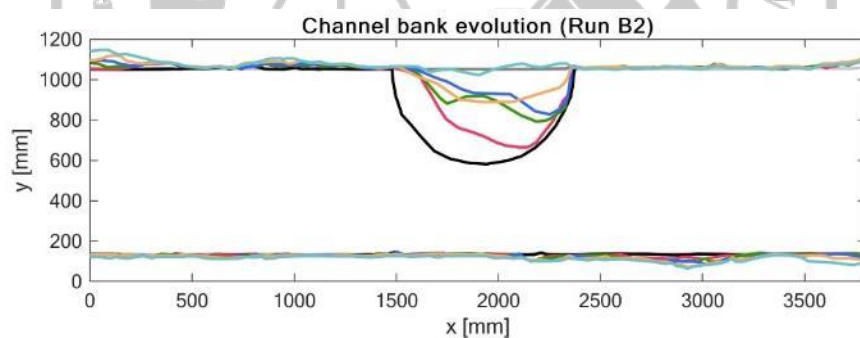
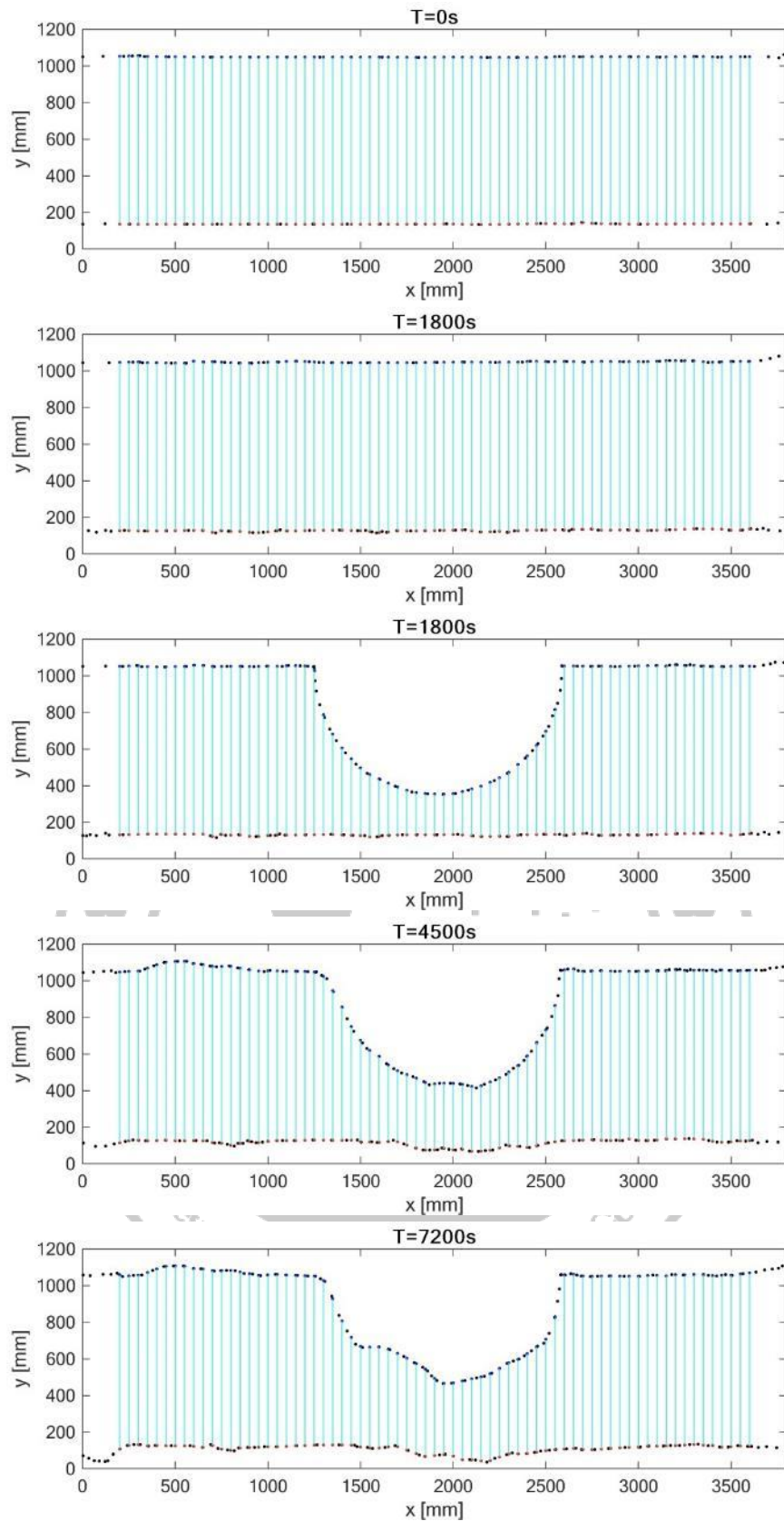


圖 4-50 B2 實驗之河寬隨時間演化圖



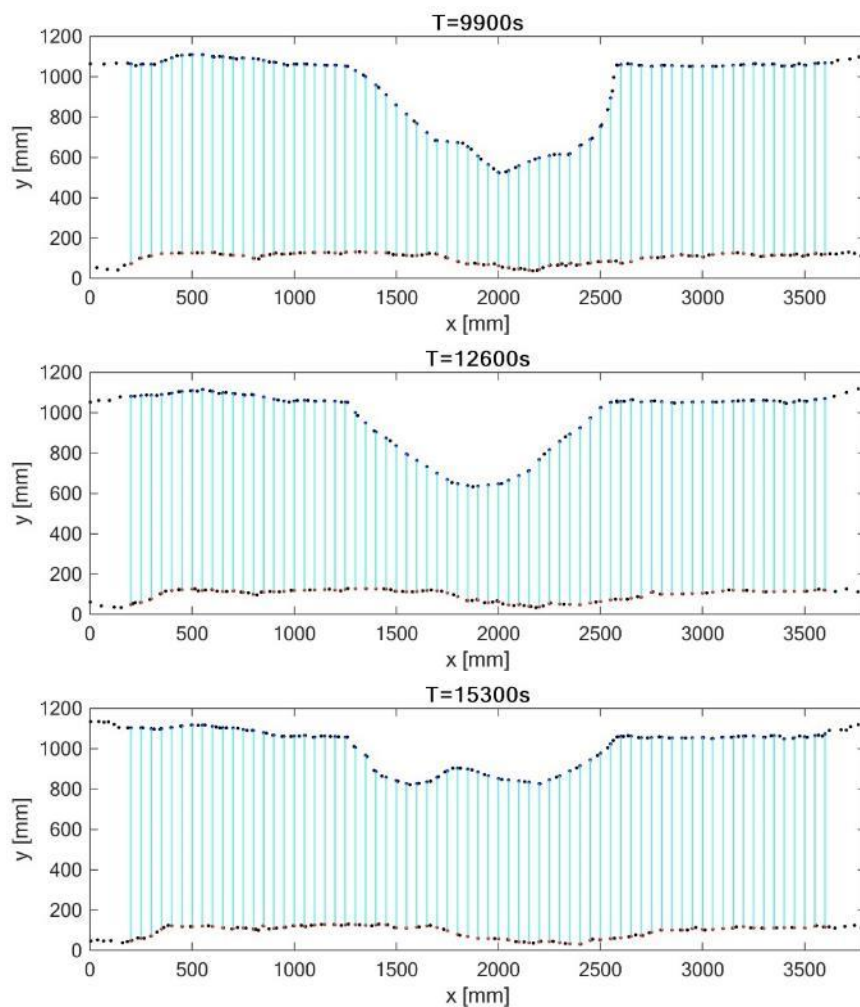


圖 4-51 B3 實驗之河寬隨時間的變化

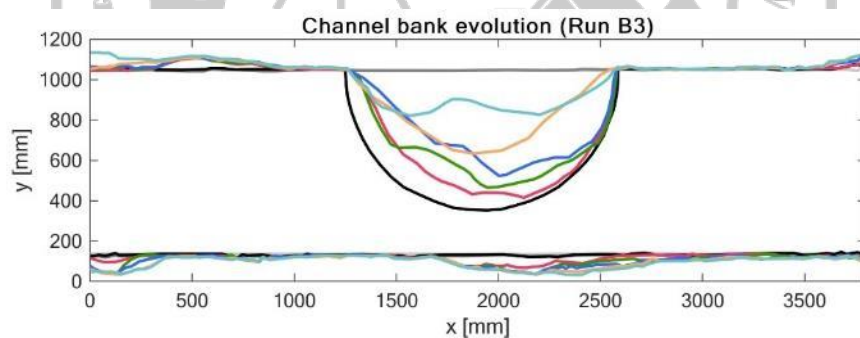


圖 4-52 B3 實驗之河寬隨時間演化圖

6. 數值高程差異圖(DoD)

數值高程差異圖(DoD)為將兩不同時間之數值高程相減所得，本小節將展示六組實驗在每個階段中辮狀河道侵蝕與堆低的程度與分布位置(圖 4-53 至圖 4-58)。其中紅色代表堆積，白色代表高程無變化，藍色代表侵蝕，而高程最大值及最小值則為+10mm 及-10mm。

總體而言，不論 A 系列或 B 系列都可以觀察到 stage02-stage01 的 DoD 中，側向沖積扇的上游處有堆積情形產生，且側向沖積扇的半徑越大，堆積的程度與範圍亦會越大，而堆積的主要原因是側向沖積扇上游區域之水流，流速因為側向沖積扇的突然出現而減緩，導致輸砂能力下降而堆積。



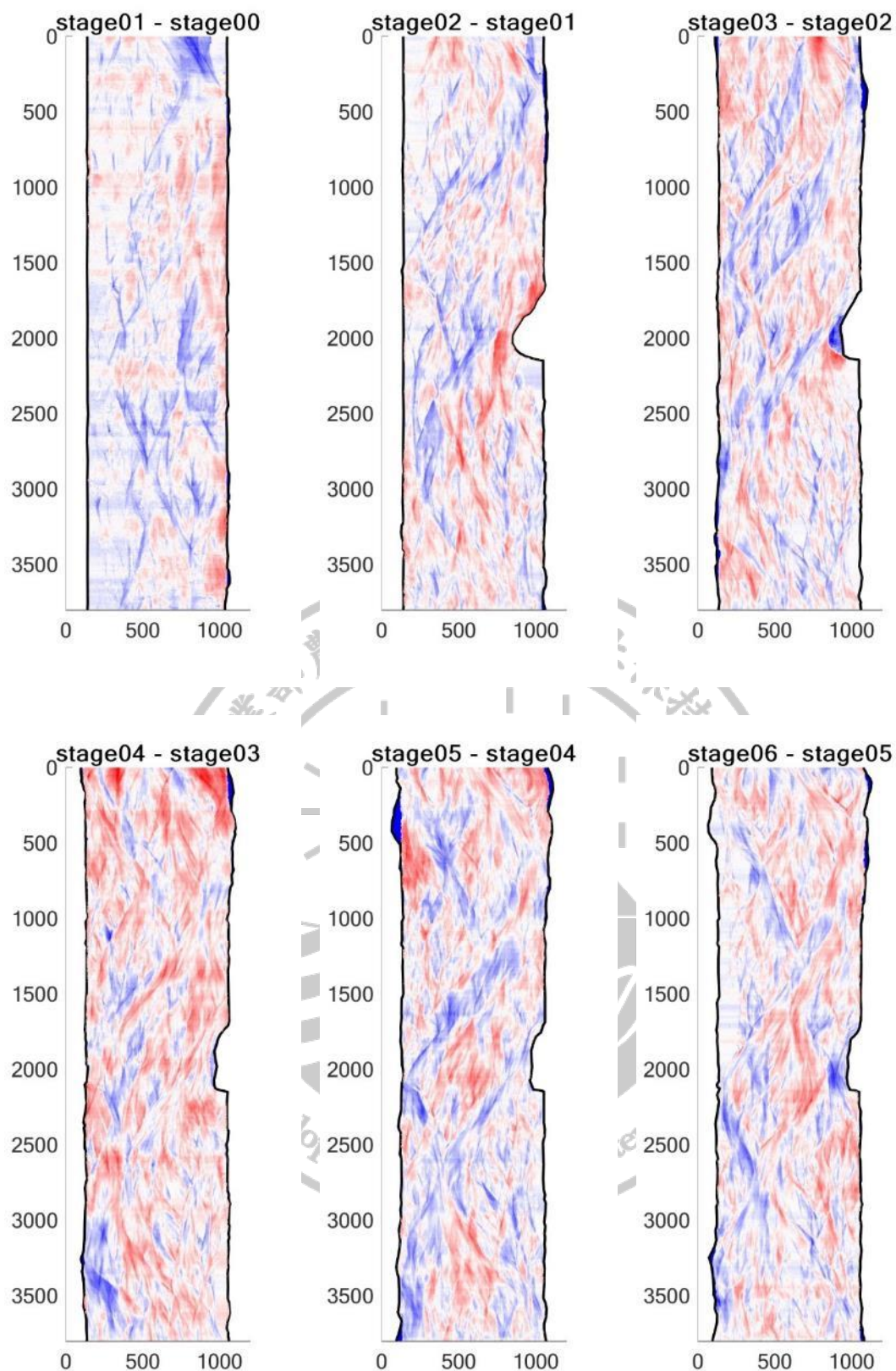


圖 4-53 A1 實驗各階段相減之數值高程差異圖

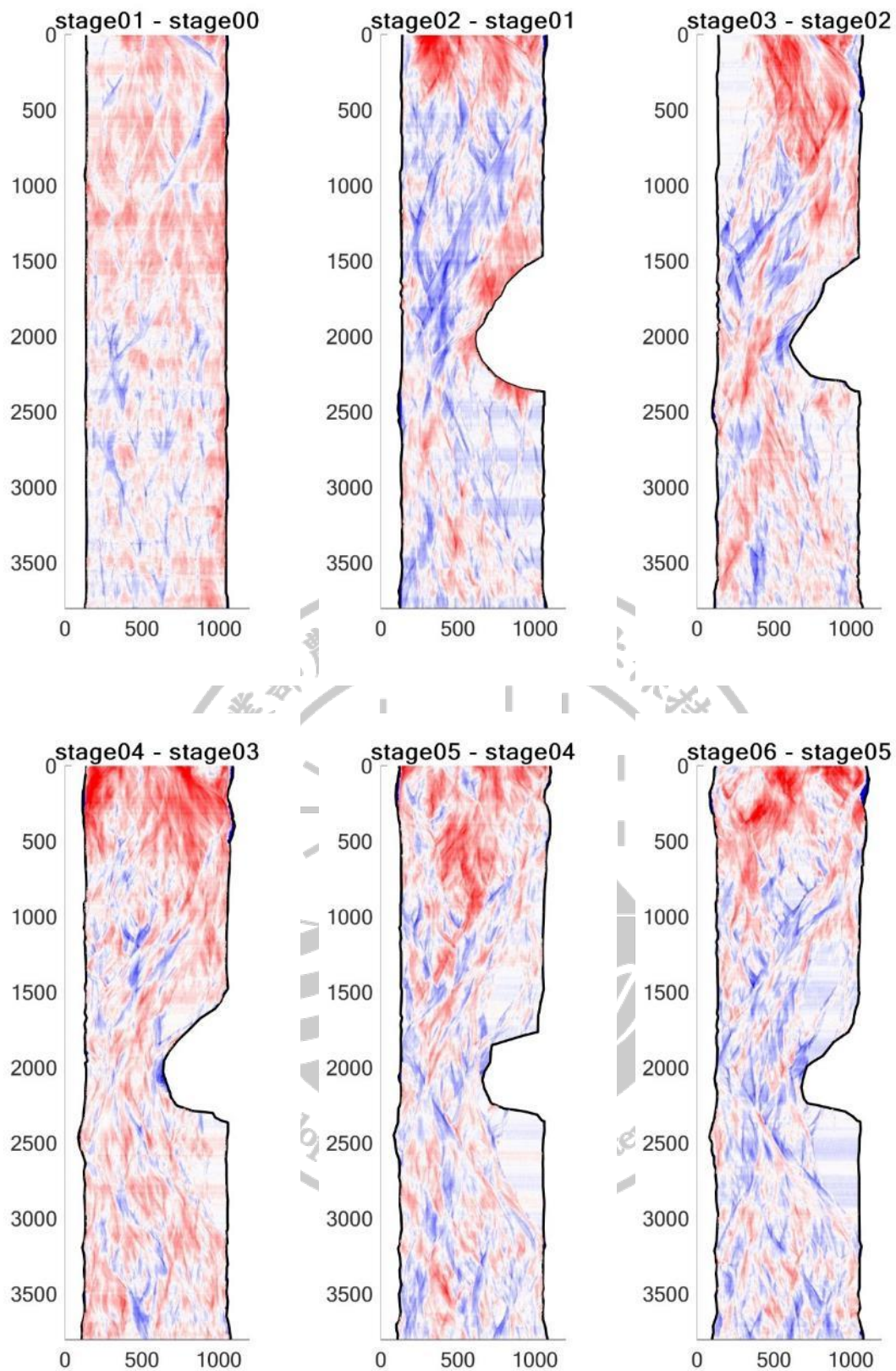


圖 4-54 A2 實驗各階段相減之數值高程差異圖

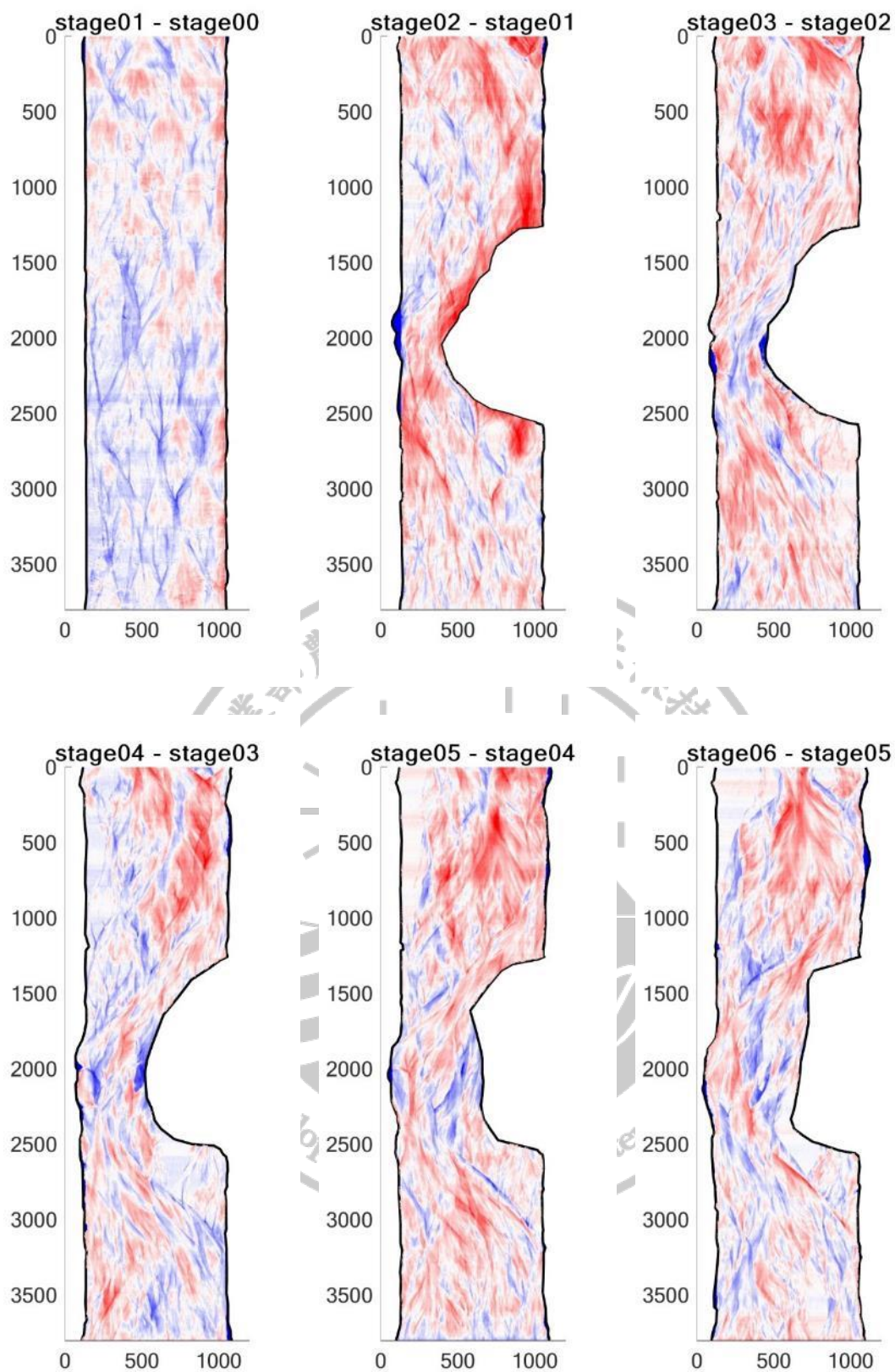


圖 4-55 A3 實驗各階段相減之數值高程差異圖

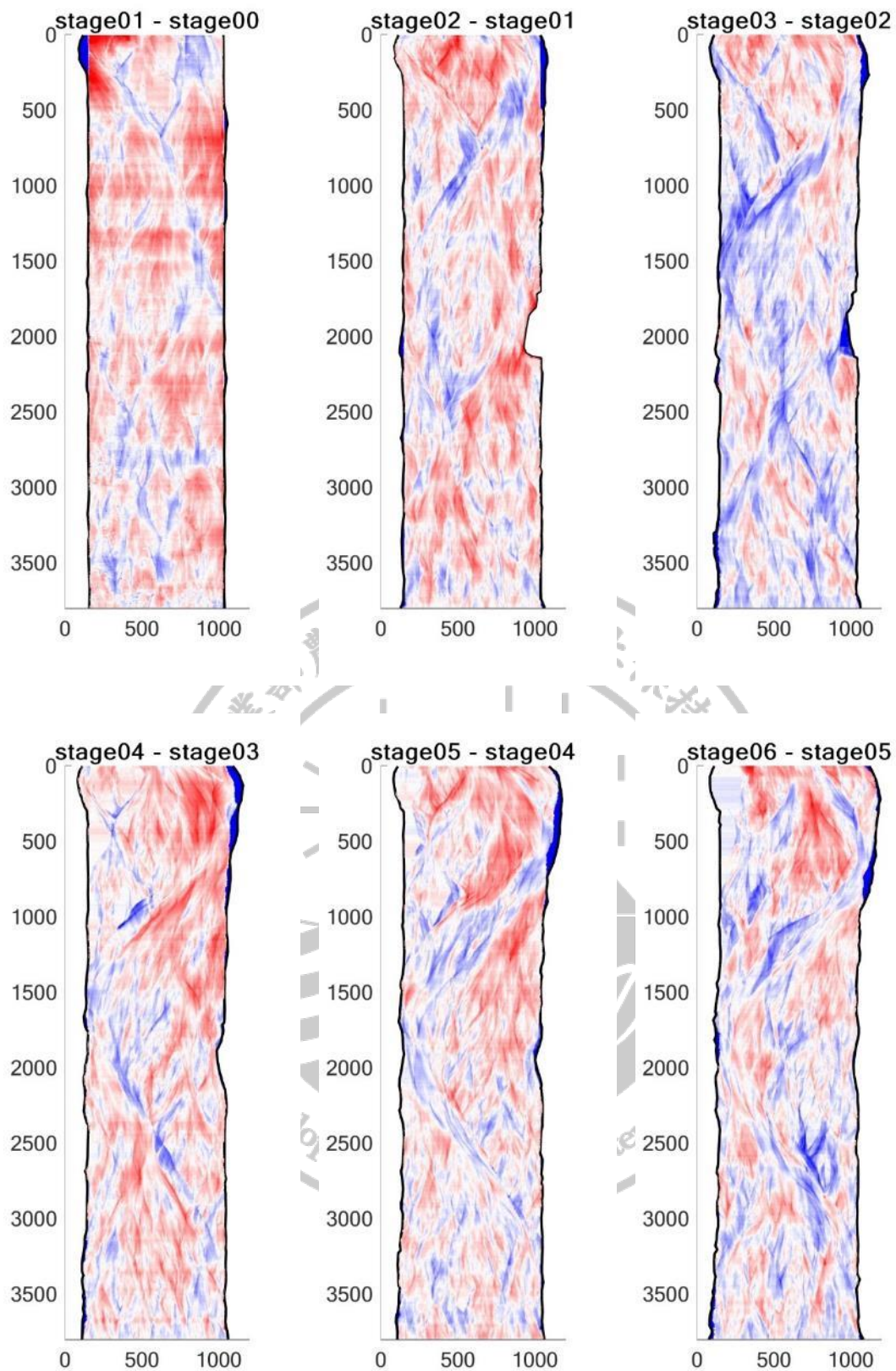


圖 4-56 B1 實驗各階段相減之數值高程差異圖

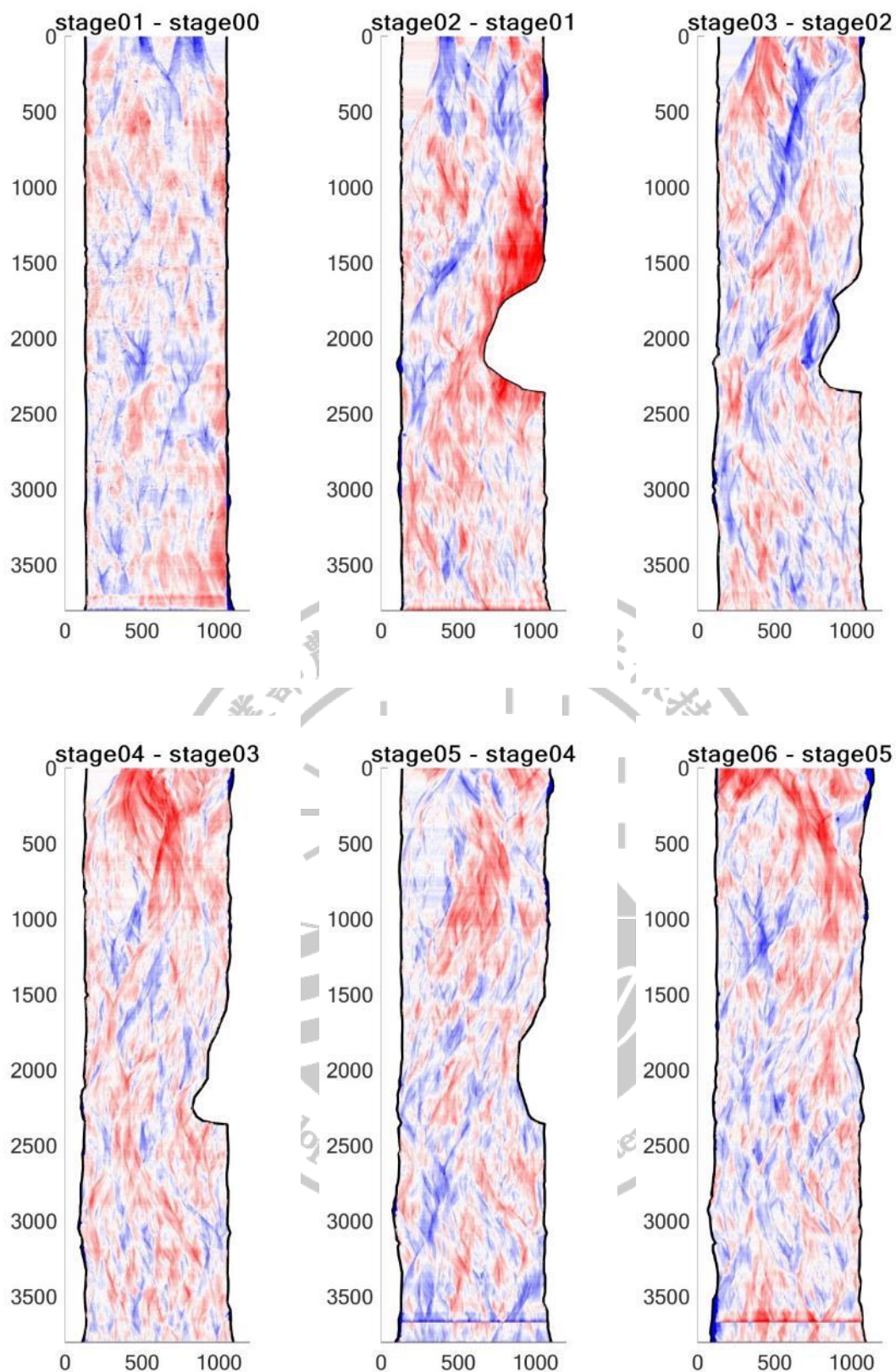


圖 4-57 B2 實驗各階段相減之數值高程差異圖

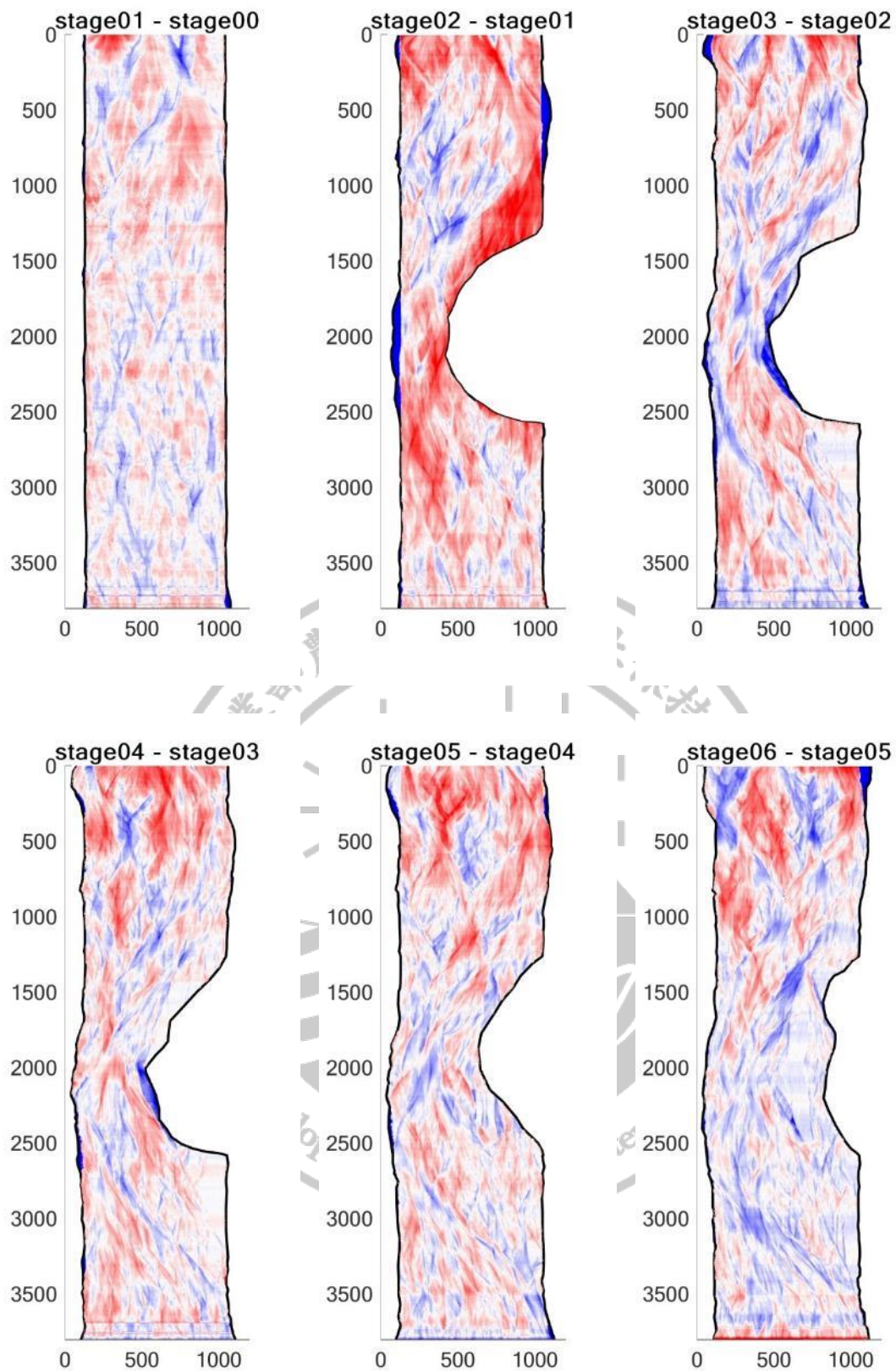


圖 4-58 B3 實驗各階段相減之數值高程差異圖

7. 數值模擬

本計畫選擇 iRIC 中的 Nays2DH 模組進行數值模擬，探討此模式是否能模擬辮狀河道系統，以及側向沖積扇對主流之影響的模擬效果。

(i) 模式設定

a. 匯入地形資料

要將地形資料匯入數值模擬軟體時，需考量模擬精細度與數值模擬軟體能力限制，地形資料越精細則越能保證模擬結果不失真，但網格數過於密集也會導致軟體運算時間增加，乃至於無法計算。若地形資料較網格精細，軟體則會將一個網格內資料平均成一筆，對模擬結果並無幫助。故在斟酌後選擇將實驗之 1 mm 數值高程精度，轉換為數值模擬軟體適用之 10 mm 數值高程精度。另外為使模擬效果較接近實驗，需在實驗地形上下游進行延伸，上游延伸 1100 mm，而下游則延伸 600 mm，故延伸後的實驗地形上游至下游總長 5500 mm，原長 3800 mm，如此能使上下游的邊界影響不會造成模擬結果失真，最後將延伸後的實驗地形匯入 Nays2DH(圖 4-59)。

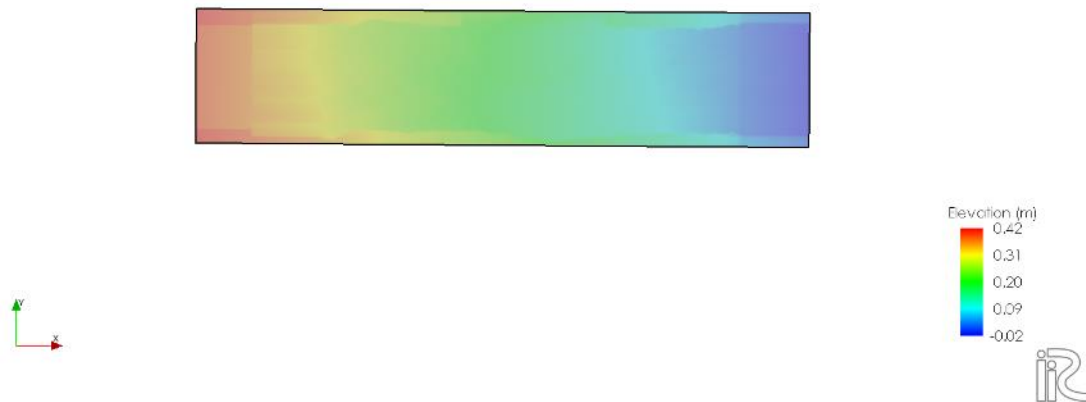


圖 4-59 匯入 Nays2DH 之地形資料

b. 建置網格系統

將實驗地形匯入後，利用 iRIC 中的網格建置系統在地形上建立 Nays2DH 模擬時所需的矩形網格座標，根據延伸後的實驗地形，x 軸範圍為 0 公尺至 5.5 公尺，y 軸範圍為 0 公尺至 1.2 公尺，且網格寬度設為 0.01 公尺。又地形的下游因模式的限制而無法將網格設置在地形最下游，故網格會從最下游邊界處往上游移動 0.01 公尺，最終建成 550*121 之網格地形(圖 4-60)。

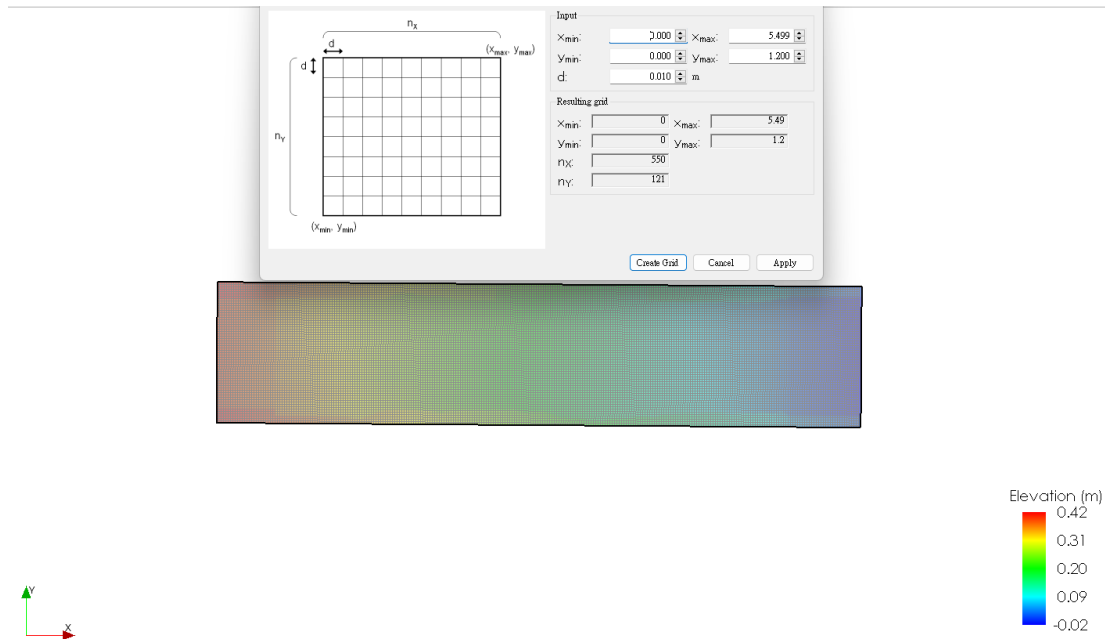


圖 4-60 於地形上建置網格

c. 設定計算條件

首先，將模擬區域全域設置相同之曼寧粗糙係數，而曼寧粗糙係數之設定詳情會在下文參數敏感度分析處詳細說明。

基礎設定完成後，即可進入計算條件中進行設定，本計畫中所設定之模擬計算條件皆大致相同，僅上游入流量及運算時間會因實驗數據而有所改變，如六組實驗皆有律定之入流量（表 4-2），且本計畫之運算時間皆與實驗的各階段時長相同，而實驗中辮狀發展階段與主實驗階段的時長不同（本文 P.4-10），故運算時間亦會不同。

本計畫之計算條件設定為動床，泥砂粒徑 d_{50} 為 0.41 mm，而計算步幅設定為 0.001。底床載計算公式選用 Ashida and Michiue 經驗公式。

$$q_b = 17\tau_{*e}^{1.5}(1 - K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*})(1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}})\sqrt{s_g g d^3 r_b}$$

其中 q_b 為底床載； τ_* 為剪應力(Shields number)； τ_{*c} 為有效剪應力(effective Shields number)； K_c 為局部河床坡度對輸砂影響的修正函數； s_g 為浸沒比重； d 為泥砂粒徑； g 為重力加速度； r_b 為交換層厚度函數。

而懸浮載計算公式選用 Itakura and Kishi 經驗公式。

$$q_{su} = K \left[a_* \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \cdot \frac{gd}{u_s} \Omega - w_f \right] r_b$$

其中 q_{su} 為懸浮載； K 為 0.008； a_* 為 0.14； ρ_s 為泥砂密度； ρ 為泥砂密度； w_f 為懸浮載沉降速度； u_* 為無因次水流流速； Ω 可由方程式計算取得。

d. 檢視模擬結果

若能完整模擬運算時長（辨狀發展階段為 1800s，而主實驗任一個階段為 2700s），為模擬成功，反之則模擬失敗。Nays2DH 成功完成運算後，可於軟體左側工具欄處勾選欲呈現的不同種類之計算結果，如水流深度、高程、流速、高程差異等，即可得到視覺化的模擬結果，並匯出模擬結果之 csv 檔，便可在 MATLAB 中分析。

(ii) 參數敏感度分析

根據劉欣昀（2022）之研究，更改 Nays2DH 模式之底床載輸砂公式、懸浮載輸砂公式及紊流黏滯係數計算方式皆對辨狀河道形貌發展影響較小，而曼寧粗糙係數 n 對模式之模擬結果影響較大。故本計

畫將測試曼寧粗糙係數 n 對於模擬結果之影響，從水流型態及地形資料找出較適合本計畫之模擬參數。而本計畫之測試之曼寧粗糙係數 n 來源於過往經驗以及各式曼寧粗糙係數之經驗公式。 n 分別為 0.03、0.0172、0.0136 及 0.0129 共四種進行測試。

以 A3 實驗進行曼寧粗糙係數 n 測試，將 A3 實驗第 1800 秒（stage01，側向沖積扇鋪設完畢）之地形匯入，並設定不同之曼寧粗糙係數 n ，並輸入實驗相關數據，其餘參數保持預設，另 Nays2DH 進行運算 2700 秒，使其模擬出實驗第 4500s(stage02)之地形，接續匯入 MATLAB 展示水流型態及地形資料之模擬結果。

表 4-3 曼寧粗糙係數測試組數

模擬之實驗組別	A3			
曼寧粗糙係數 n （全域）	0.03	0.0172	0.0136	0.0129

$n = 0.03$ 此曼寧粗糙係數為過往模擬所選用之值， $n = 0.0172$ 是依據 Rice (1998) 所提出之曼寧經驗公式所得。 $n = 0.0136$ 是將數個經驗公式所求 n 值之平均，包含 Stricker (1923)、Meyer-Peter and Muller (1948)、Handerson (1966)、Anderson (1970)、Garde and Raju (1976)、Bray (1979)、Subramanya (1982) 及 Rice (1998) 共九組經驗公式。 $n = 0.0129$ 則是依據 Stricker (1923) 所提出之曼寧經驗公式所求得之值，以上可參考表 4-4。

表 4-4 曼寧係數與溝床床面泥沙代表粒徑之關係式

作者(年代)	曼寧 n 值經驗公式(d_{50} in mm)	n
Stricker (1923)	$n = 0.015d_{50}^{1/6}$	0.0129
Meyer-Peter and Muller (1948)	$n = 0.0122d_{90}^{1/6}$	0.0116
Handerson (1966)	$n = 0.0131d_{50}^{1/6}$	0.0113
Anderson (1970)	$n = 0.0152d_{50}^{1/6}$	0.0131
Garde and Raju (1976)	$n = 0.015d_{50}^{1/6}$	0.0129
Bray (1979)	$n = 0.0171d_{50}^{0.179}$	0.0146
	$n = 0.0164d_{90}^{0.16}$	0.0156
Subramanya (1982)	$n = 0.0149d_{50}^{1/6}$	0.0129
Rice (1998)	$n = 0.029S^{0.147}d_{50}^{0.147}$	0.0172
	average	0.0136

註: $d_i = i\%$ 溝床值粒徑小於 d_i 值；

S = 溝床坡度，本實驗之溝床坡度為 0.07



曼寧 n 值敏感度分析主要以圖 4-61 與圖 4-62 此進行定性分析，圖中之時間點皆為實驗開始後第 4500s(即為主實驗第一階段結束)。於圖 4-61 可以觀察到 $n = 0.03$ 之水流較實驗分散，且有大量水流爬升至側向沖積扇所在之位置，與實驗結果不符。而 $n = 0.0129$ 之水流較前者集中，但水流樣貌與現實不符，故兩組曼寧 n 值 $n = 0.03$ 及 $n = 0.0129$ 不予採納。

進一步於圖 4-62 處比較側向沖積扇所導致之右岸河灘地侵蝕位置， $n = 0.0172$ 右岸之侵蝕位置約在 $x = 2000\text{mm}$ 處， $n = 0.0136$ 右岸之侵蝕位置約在 $x = 2400\text{mm}$ 處，而實驗結果右岸之侵蝕位置約在 $x = 2000\text{mm}$ 處， $n = 0.0172$ 與實驗結果較為相符。故最終選擇 $n = 0.0172$ 為 Nays2DH 模式中曼寧粗糙係數之值。



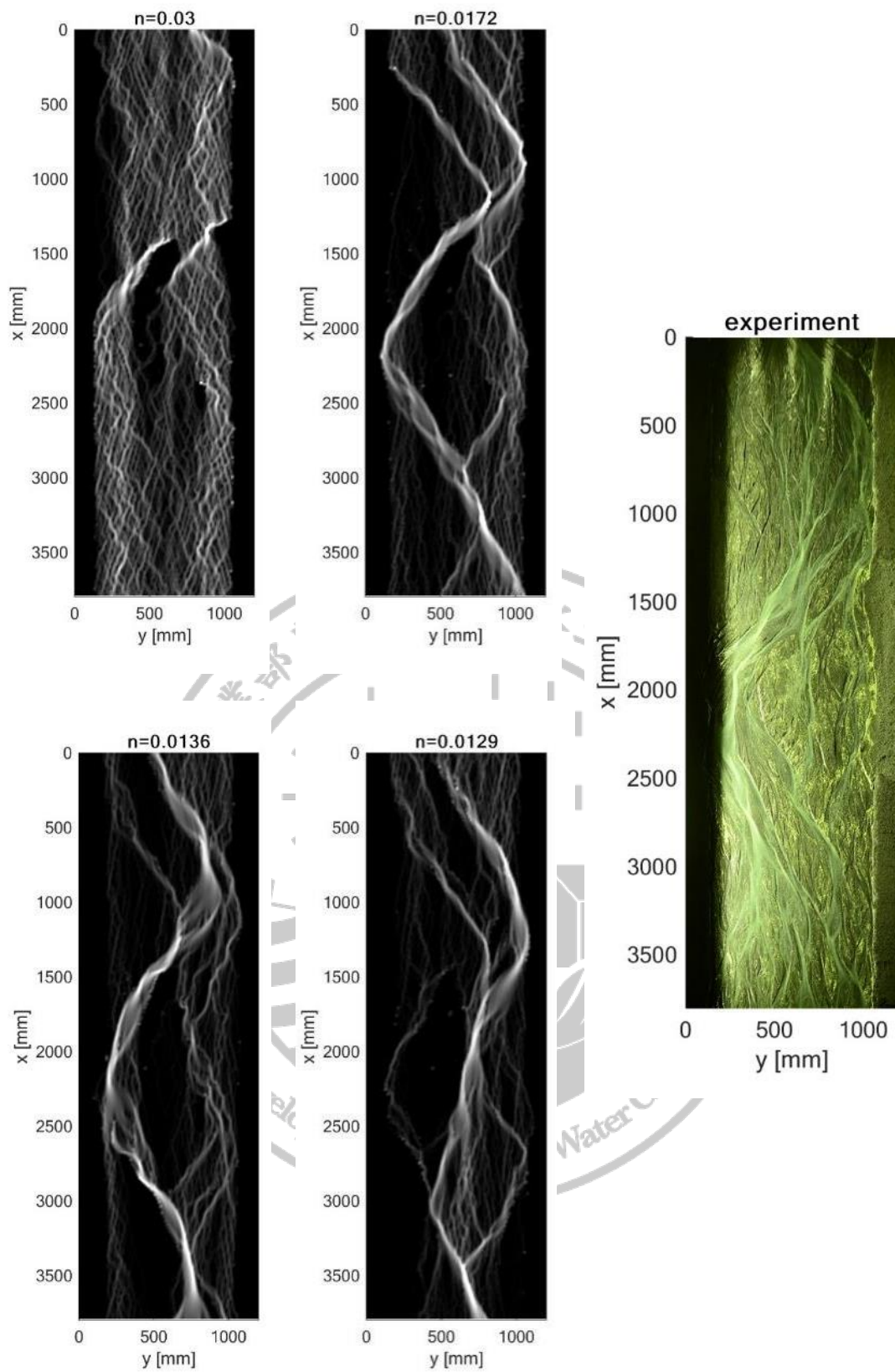


圖 4-61 實驗及各式曼寧粗糙係數所模擬之水流對比圖

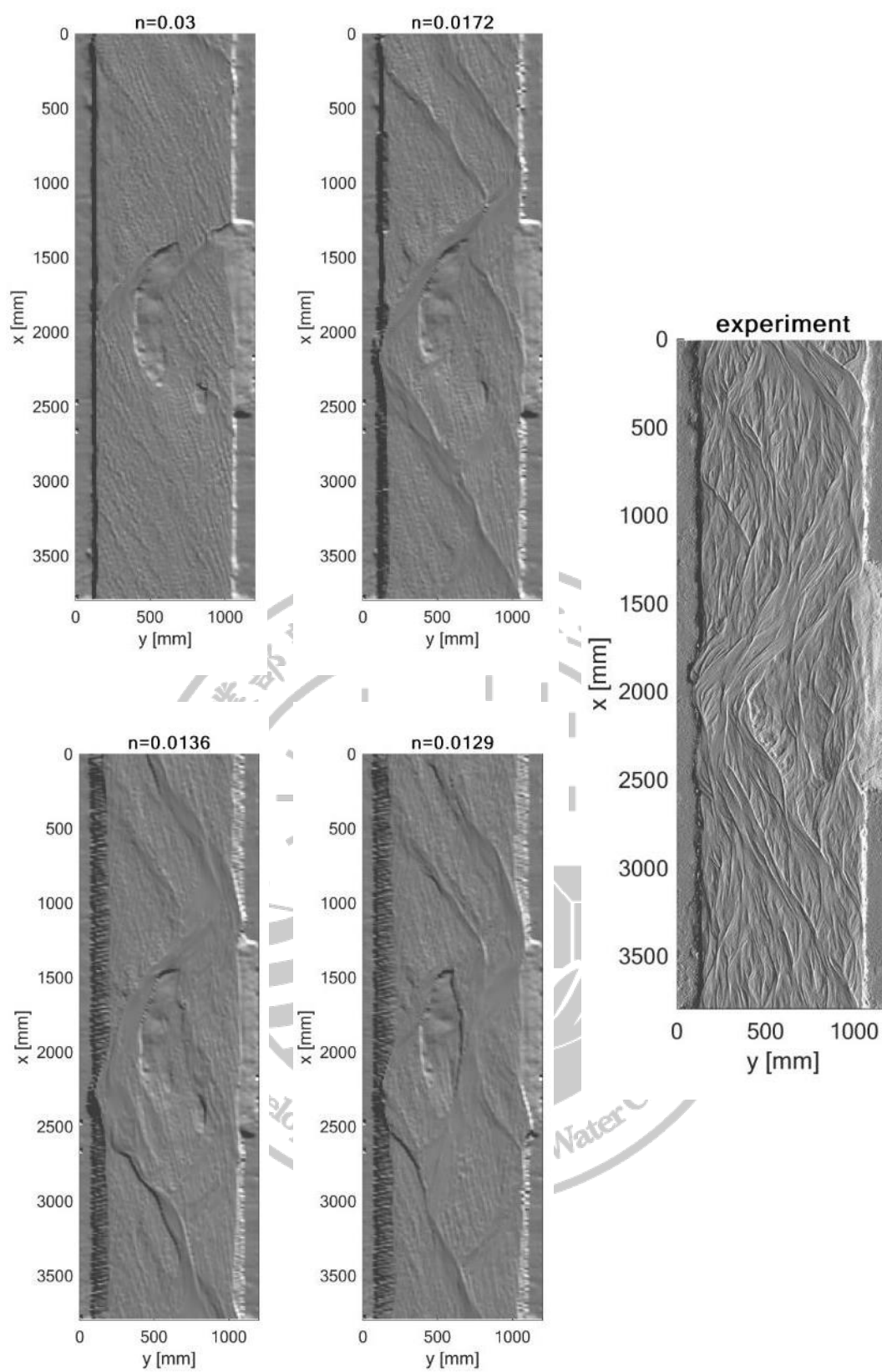


圖 4-62 實驗及各式曼寧粗糙係數所模擬之光源陰影對比圖

(iii) 模擬結果

模擬結果以模擬結果間的比較以及實驗與模擬結果之比較兩點呈現。

a. 模擬結果比較

由於模擬一組實驗(45 分鐘)所需計算時間接近 30 小時，故本計畫將以 A1 及 A3 模擬水流及光源陰影圖進行比較。於水流比較圖(圖 4-63 至圖 4-64)可以觀察到側向沖積扇的尺寸會大幅度影響水流的走向及流域面積，A1 由於側向沖積扇尺寸較小，所以水流幾乎都不受限制，於河道內自由形成辮狀河道；而 A3 之側向沖積扇尺寸較大，故水流會因撞擊側向沖積扇而匯聚成一較明顯之主流，並往沖積扇之對岸河灘地撞擊產生侵蝕。

而從 A1 及 A3 之光源陰影圖可以觀察到側向沖積扇的演化過程，以及沖積扇尺寸不同所造成的演化差異(圖 4-65 至圖 4-66)。A1 之側向沖積扇於 stage5($T = 12600s$)時已接近消失，而 A3 之側向沖積扇於模擬結束時都無消失的跡象，仍會對水流產生影響。

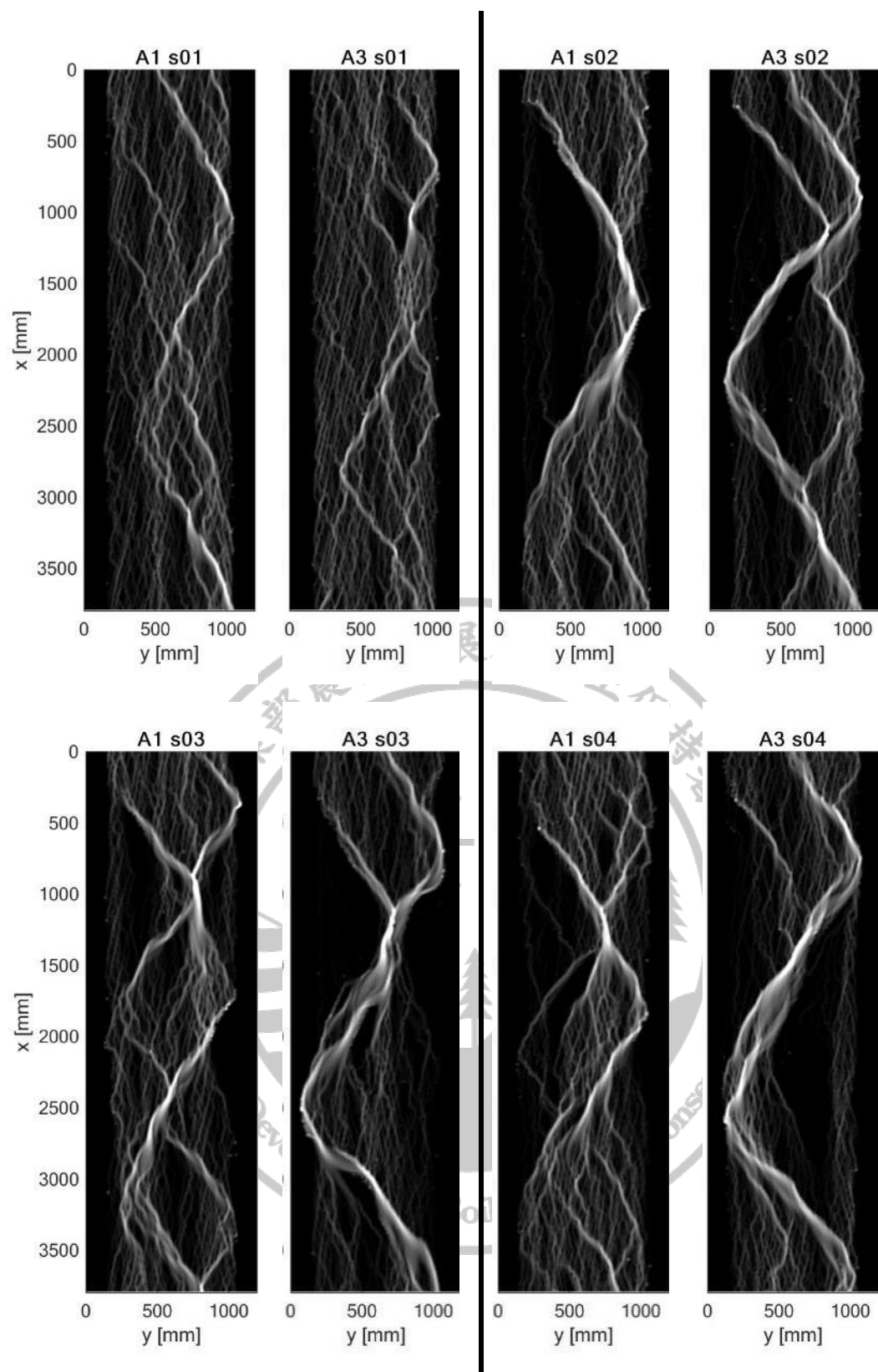


圖 4-63 A1 及 A3 模擬之水流結果比較圖

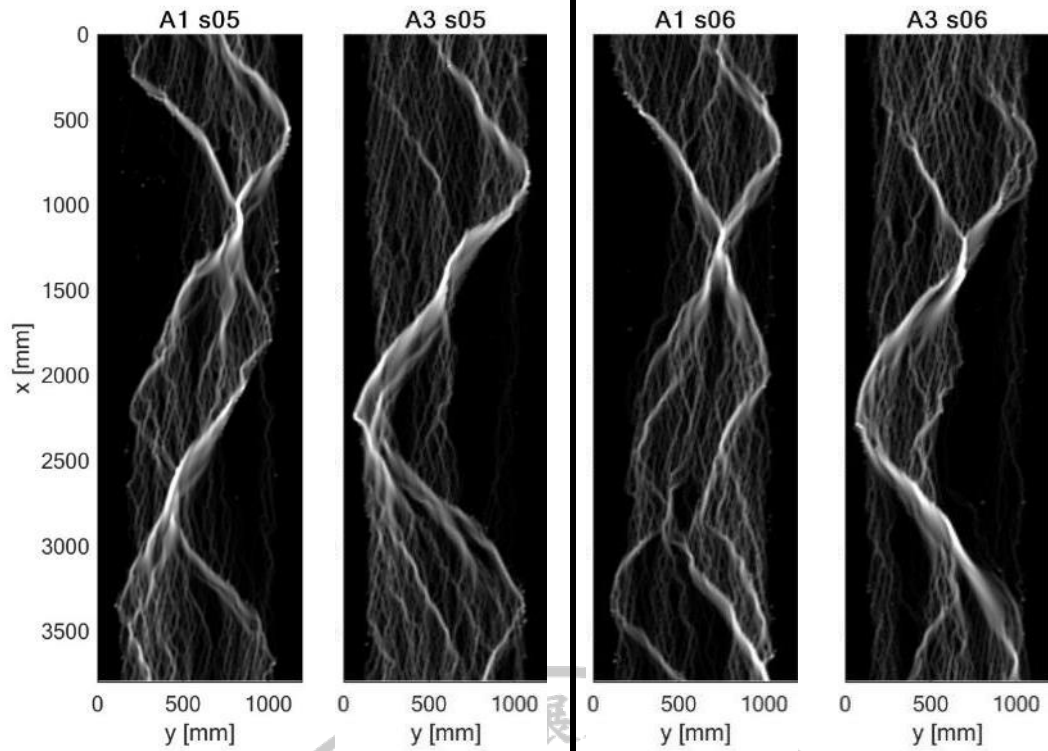


圖 4-64 A1 及 A3 模擬之水流結果比較圖(續)

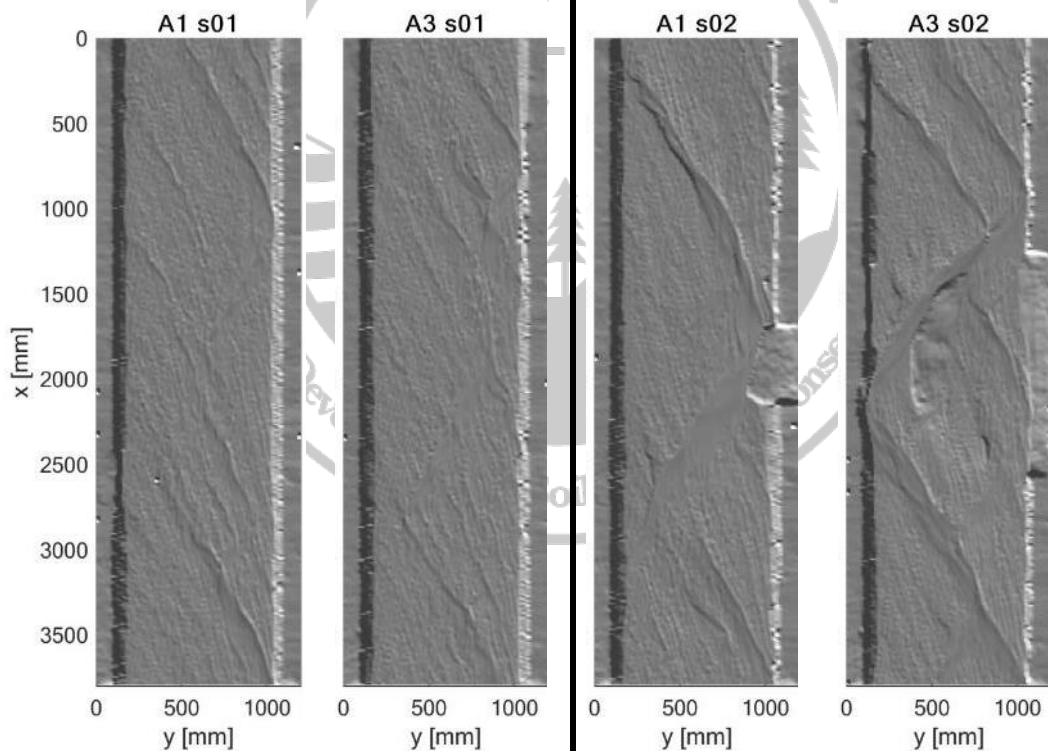


圖 4-65 A1 及 A3 模擬之光源陰影比較圖

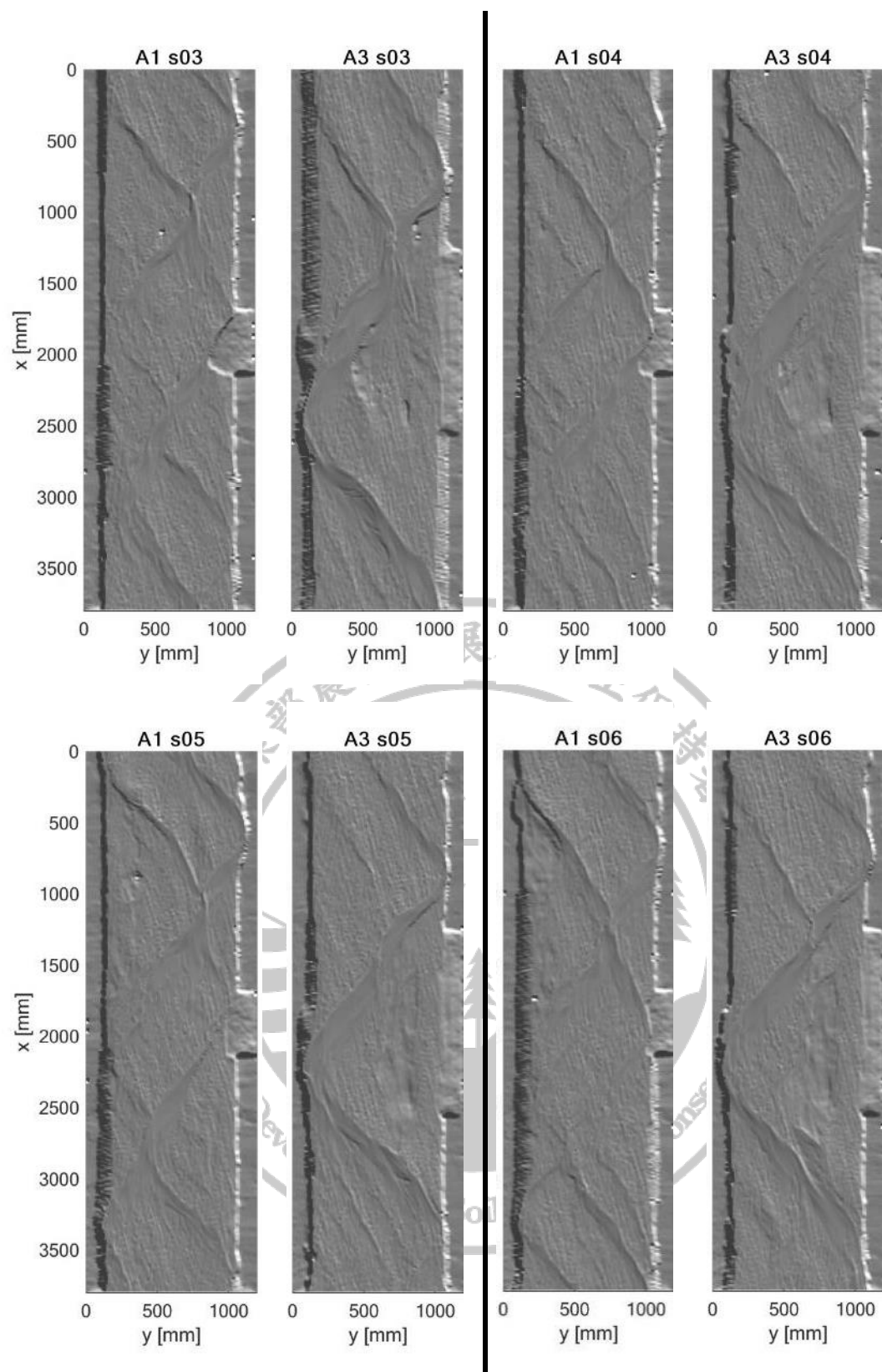


圖 4-66 A1 及 A3 模擬之光源陰影比較圖(續)

b. 實驗與模擬結果比較

本計畫將以 A3 實驗與模擬之水流結果及光源陰影圖進行比較。

於水流比較圖(圖 4-67 至圖 4-68)可以觀察到實驗與模擬之水流結果高度相似，皆因側向沖積扇的出現而使水流匯聚成一主流，並往側向沖積扇對岸之河灘地進行侵蝕，但仍保持辮狀的型態持續演化。

而光源陰影比較圖(圖 4-69 至圖 4-70)可以看到實驗結果較模擬結果細緻，其原因為實驗之光源陰影圖精度為 1 mm*1 mm，而模擬之光源陰影圖因模擬時長的關係精度設在 10 mm*10 mm，兩者精度不同才導致圖像差異大。但模擬之光源陰影圖仍能觀察到其側向沖積扇之演化歷程與實驗大致相似，兩者都有觀察到沖積扇隨時間被水流逐漸侵蝕，而到最後沖積扇仍然存在，繼續對水流造成影響。

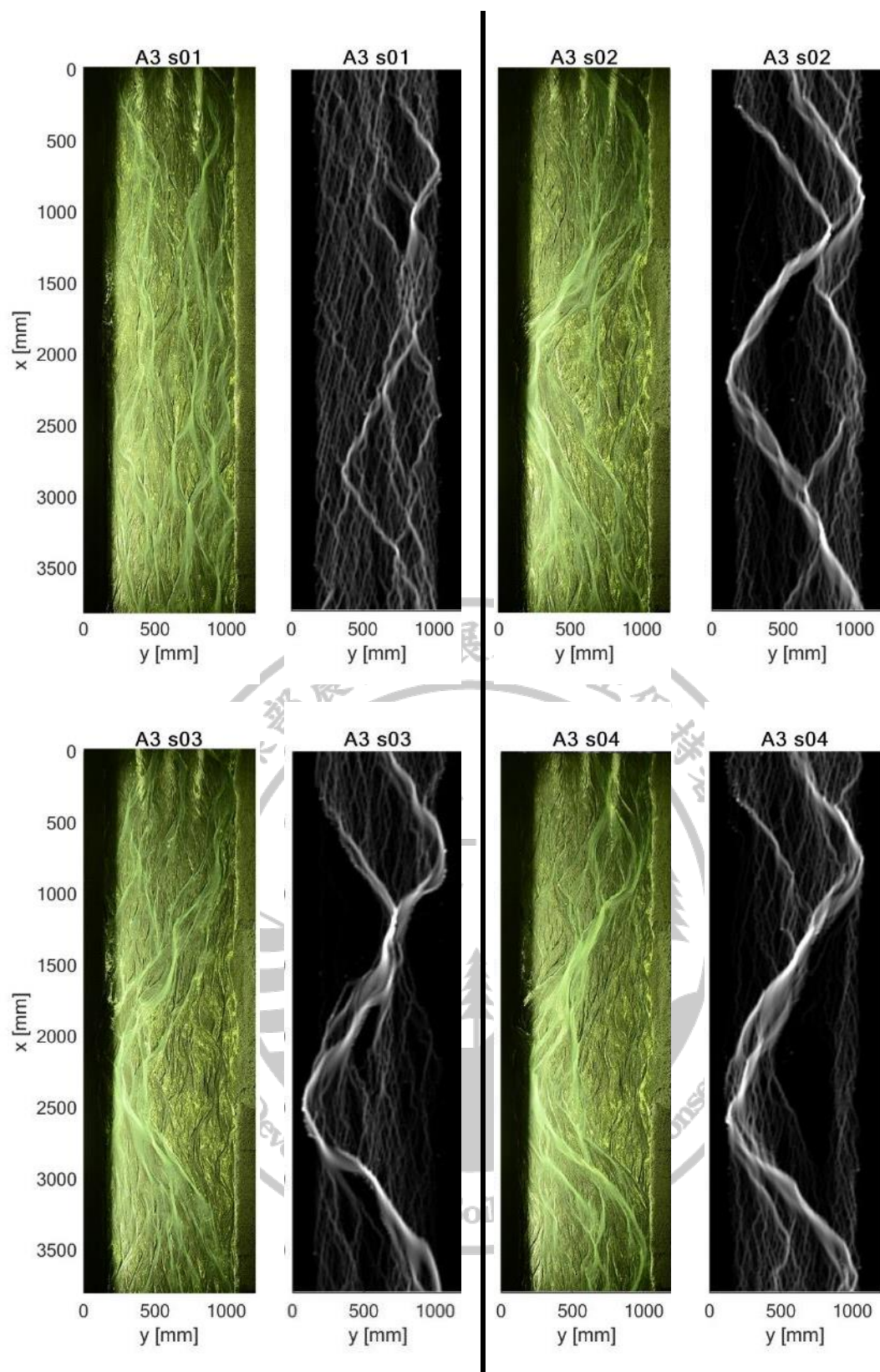


圖 4-67 A3 實驗與模擬之水流結果比較圖

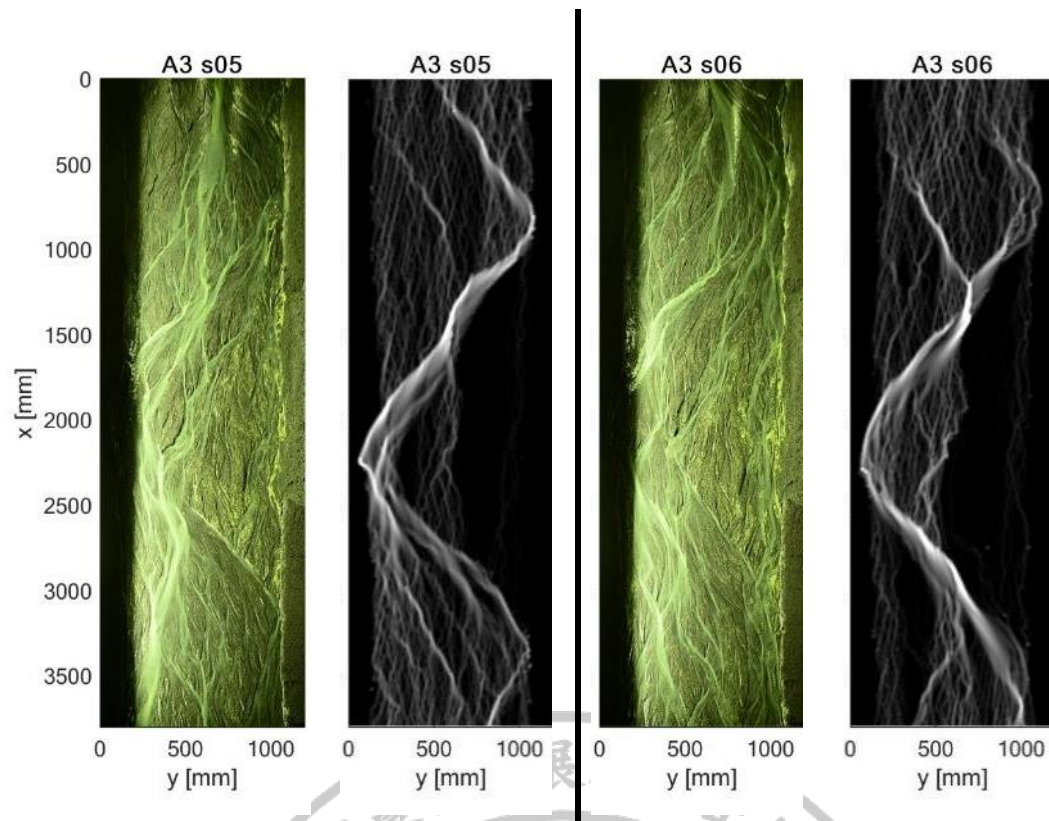


圖 4-68 A3 實驗與模擬之水流結果比較圖(續)

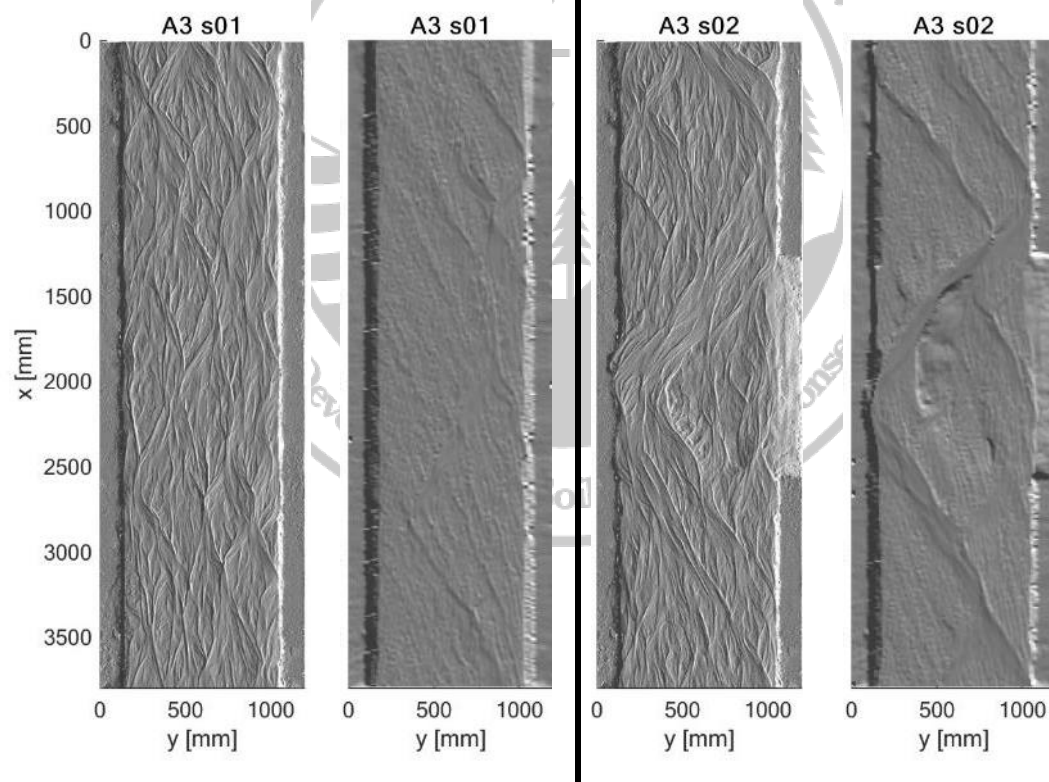


圖 4-69 A3 實驗與模擬之光源陰影比較圖

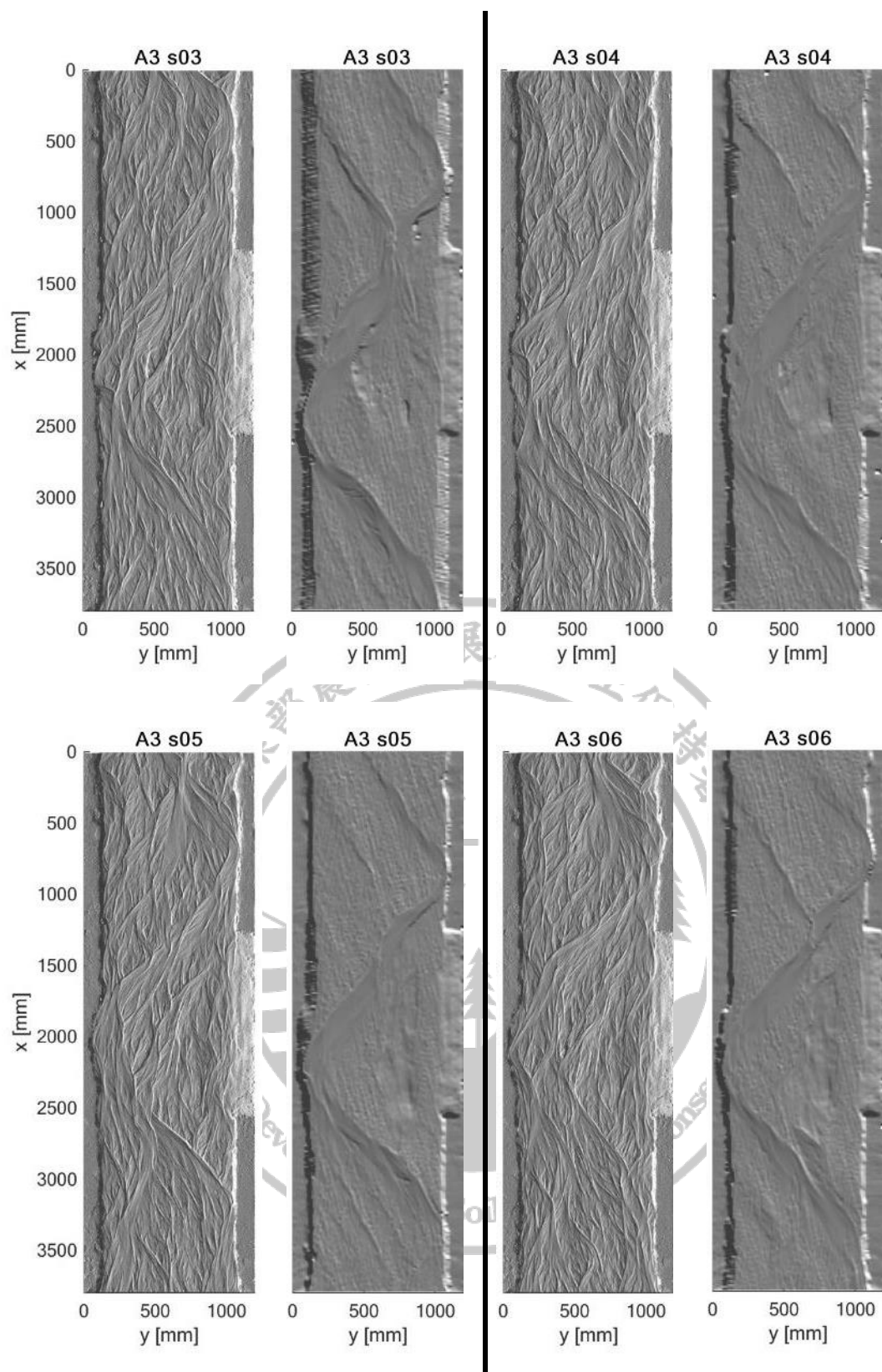


圖 4-70 A3 實驗與模擬之光源陰影比較圖(續)

8. 推估河道中土砂災害之影響範圍

於本計畫中去推估河道中土砂災害之影響範圍是主軸之一，本計畫以側向沖積扇代表河道中的土砂災害，並且有三種不同尺寸的側向沖積扇來模擬不同程度的土砂(圖 4-71)，以此對應不同的影響範圍。而影響範圍共有三大區域，以下分別進行說明。

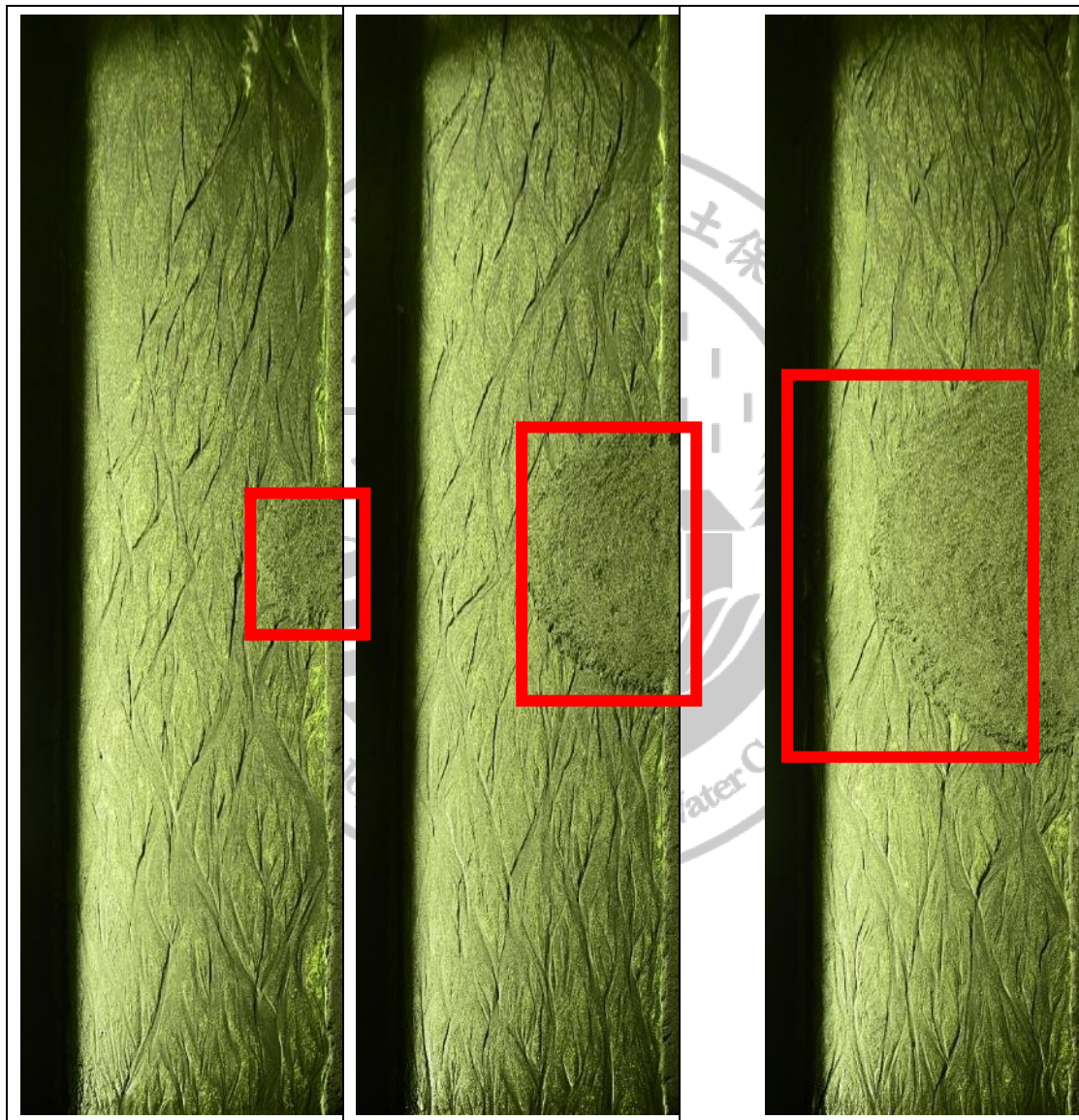


圖 4-71 不同尺寸之側向沖積扇

(i) 側向沖積扇上游

於實驗中可以發現在側向沖積扇出現後，沖積扇上游處會出現堆積，且會因沖積扇尺寸增大而堆積影響範圍隨之擴大，而堆積的情形出現後就會導致水流有可能蔓延到原坐落在河灘地上的村莊，使生命財產受到威脅。

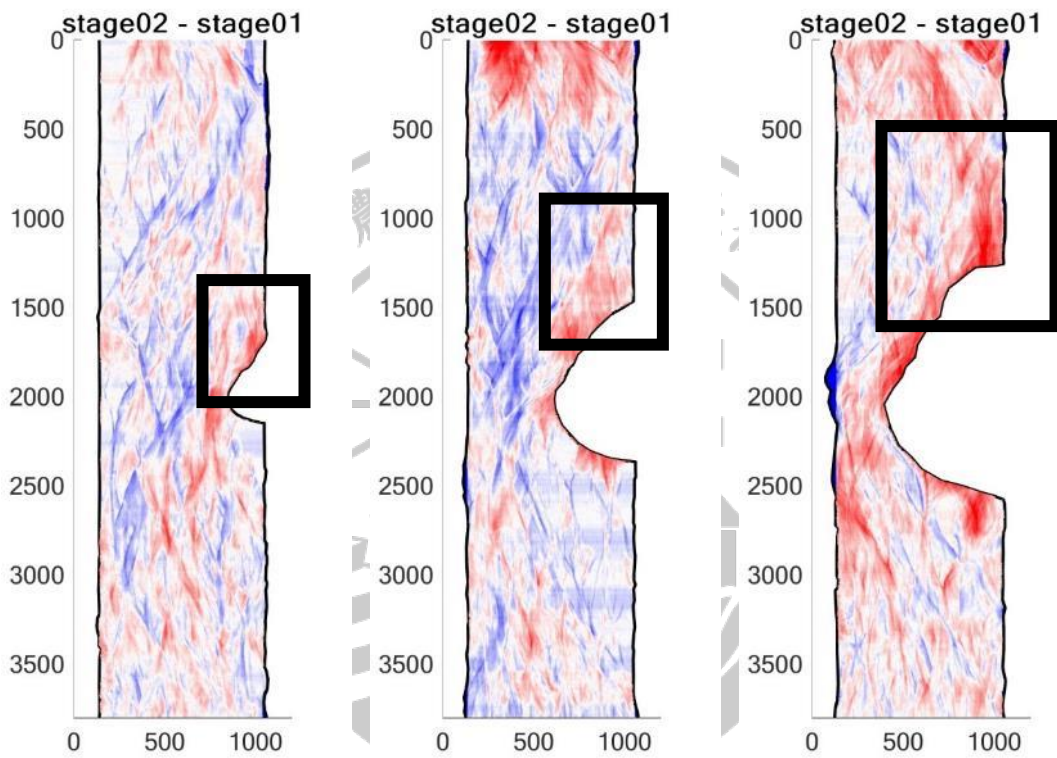


圖 4-72 側向沖積扇所導致之上游堆積現象(以 A 系列為例)

(ii) 側向沖積扇對岸

實驗中可以發現在沖積扇出現後，會一定程度上影響水流的流向，使水流匯聚為明顯的主流。沖積扇尺寸越大，於右岸河灘地的影響範

圍會逐漸往上游移動，從半徑 22 公分的沖積扇，右岸影響範圍約在 $x = 3000 \text{ mm} - 3500 \text{ mm}$ ，到半徑 66 公分的沖積扇，右岸影響範圍往上游移動至 $x = 2000 \text{ mm} - 2500 \text{ mm}$ (圖 4-73)。且沖積扇尺寸越大，越能使水流因堵塞而形成主流，故右岸侵蝕幅度與沖積扇尺寸成正相關。

(圖 4-73)

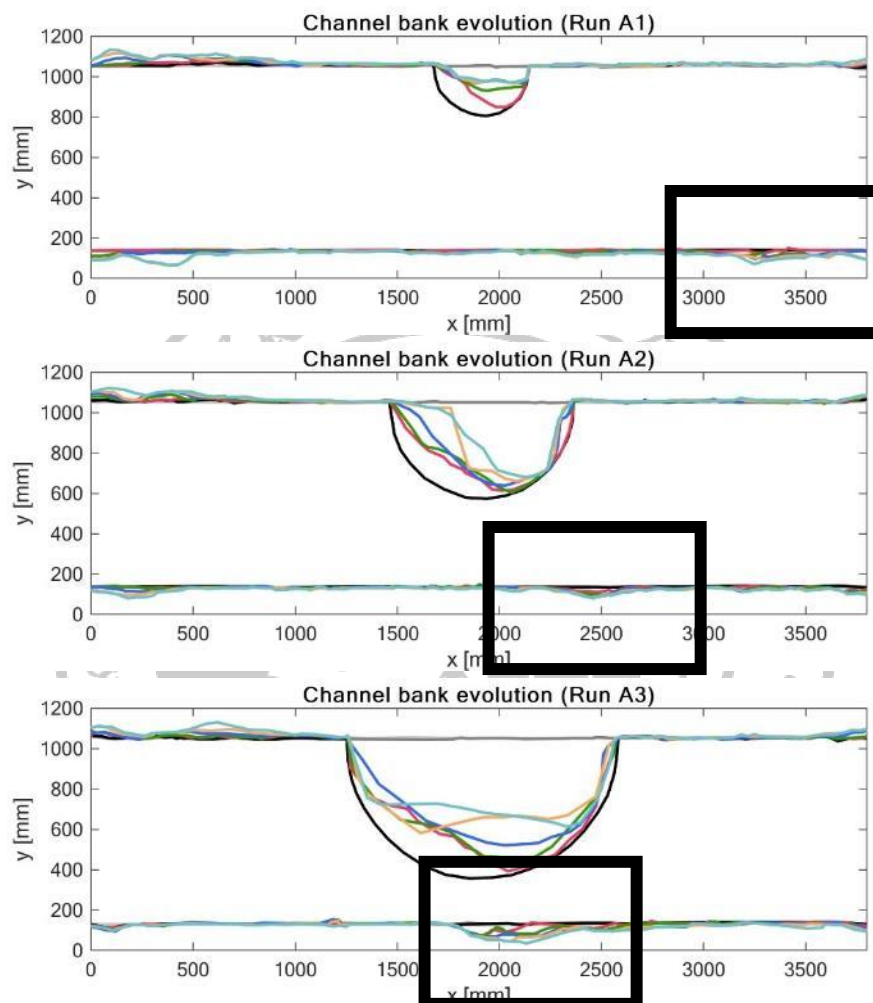


圖 4-73 側向沖積扇所導致的右岸侵蝕現象(以 A 系列為例)

(iii) 側向沖積扇下游

在側向沖積扇出現後，沖積扇會擋住來自上游的水流，使沖積扇下游較不容易有水流流經，而下游左岸之河灘地亦在實驗過程中皆無受到嚴重侵蝕(圖 4-74)，產生一個受沖積扇所保護的區域。

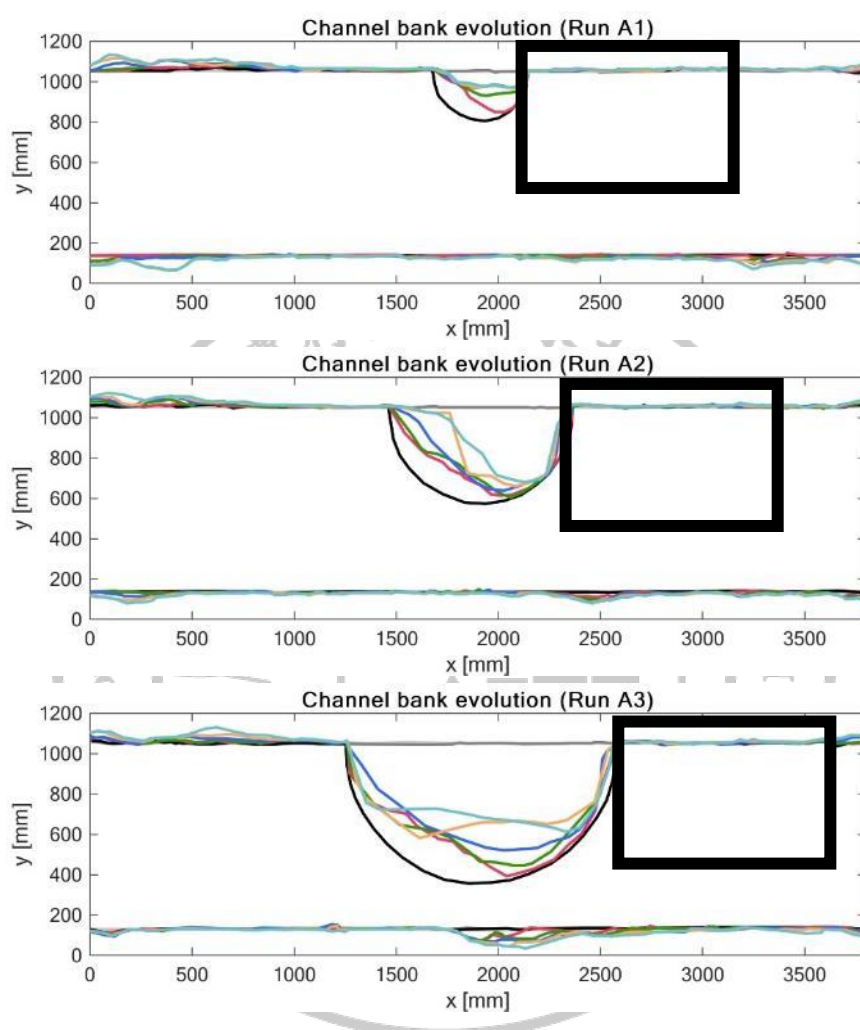


圖 4-74 側向沖積扇所導致的下游保護現象(以 A 系列為例)

五、結論及建議

第一節 結論

本計畫以透過物理實驗，定量討論河道寬度及河岸形狀對於河道辯狀程度、沙洲型態及土砂運移之影響。計畫使用成大水利系之動床水槽。目前已完成動型水槽之供水供砂系統、規劃起始地形及水砂條件、執行物理實驗、建置數值高程模型及正射影像圖。在數值模式方面，本計畫已完成數值模擬、參數敏感度分析及數值模擬成果與實驗成果之比較。透過本計畫能仔細觀察並探討不安定土砂進入河道後，以沖積扇佔據河寬的不同大小，探討河道本身的自適應調整過程及土砂隨時間的運移過程，藉此推估可能之災害影響範圍。

以目前實驗結果進行評估，A 系列($Q/Q_s = 60$)，沖積扇佔據河寬比例(r/B)為 25%時，河道恢復穩定狀態需 3 小時； $r/B = 50\%$ 時，河道恢復穩定狀態需 3.75 小時； $r/B = 75\%$ 時，河道恢復穩定狀態需 4.5 小時。而 B 系列($Q/Q_s = 90$)，沖積扇佔據河寬比例(r/B)為 25%時，河道恢復穩定狀態需 2.25 小時； $r/B = 50\%$ 時，河道恢復穩定狀態需 3 小時； $r/B = 75\%$ 時，河道恢復穩定狀態需 3.75 小時。

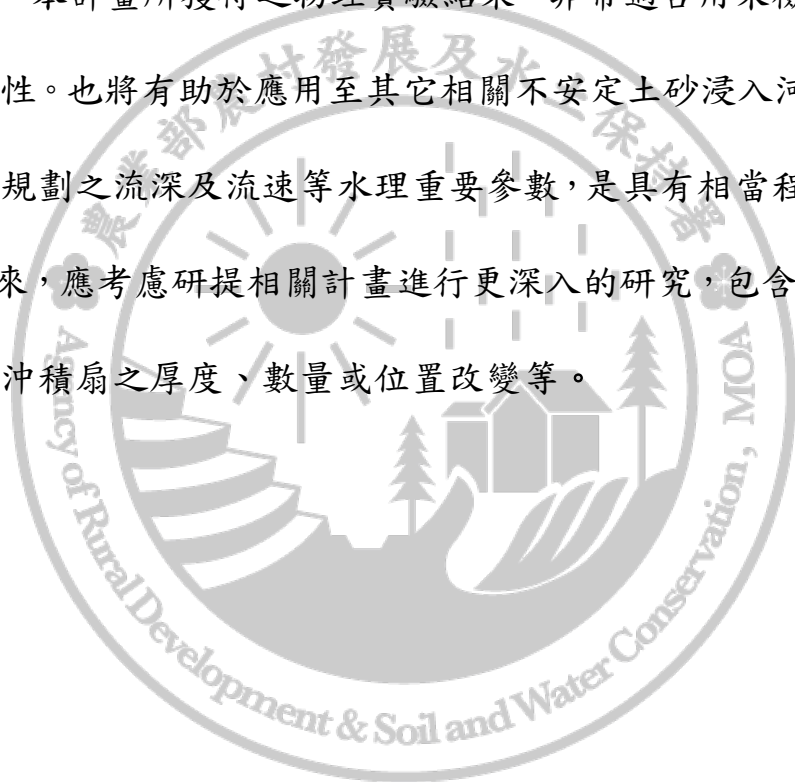
本研究可能可以類比荖濃溪受到玉穗溪支流沖積扇影響之情況。但本研究並非按照特定案例進行縮尺實驗之研究。依照土砂災害影響範圍之推估結果，建議在支流沖積扇之上游側，應注意底床堆積進而

讓水流切穿沖積扇之災害。此外，建議在支流沖積扇之對岸區域，注意河道被迫轉向所產生之沖蝕現象，應加強護岸範圍及強度。以上研究成果皆可以提供水保相關計畫的科學參考依據。

第二節 建議

未來若能有機會執行水保分署特定河段之相關計畫，更能結合實際土砂防治工程，也將有助於精準設計縮尺模型及數值模式。

此外，本計畫所獲得之物理實驗結果，非常適合用來檢視數值模式之適用性。也將有助於應用至其它相關不安定土砂浸入河道的案例，以模擬出規劃之流深及流速等水理重要參數，是具有相當程度的應用價值。未來，應考慮研提相關計畫進行更深入的研究，包含：上游變流量、側向沖積扇之厚度、數量或位置改變等。



參考文獻

- Buffington, J. M. and Montgomery, D. R.: Geomorphic classification of rivers: An updated review, *Treatise on geomorphology*, 2, 1-47, 2021.
- Fryirs, K. and Brierley, G. J.: Antecedent controls on river character and behaviour in partly confined valley settings: Upper Hunter catchment, NSW, Australia, *Geomorphology*, 117, 106-120, 2010.
- Gray, D. P. and Harding, J. S.: Braided river ecology: a literature review of physical habitats and aquatic invertebrate communities, Science & Technical Pub., Department of Conservation, 2007.
- Huang, S. Y., Lai, S. Y., Limaye, A. B., Foreman, B. Z., and Paola, C.: Confinement width and inflow-to-sediment discharge ratio control the morphology and braiding intensity of submarine channels: insights from physical experiments and reduced-complexity models, *Earth Surface Dynamics*, 11, 615-632, 2023.
- Iwasaki, T., Shimizu, Y., and Kimura, I.: Numerical simulation of bar and bank erosion in a vegetated floodplain: A case study in the Otofuke River, *Advances in Water Resources*, 93, 118-134, 2016.
- O'Brien, G. R., Wheaton, J. M., Fryirs, K., Macfarlane, W. W., Brierley, G., Whitehead, K., Gilbert, J., and Volk, C.: Mapping valley bottom confinement at the network scale, *Earth Surface*

Processes and Landforms, 44, 1828-1845, 2019.

Williams, R. D., Measures, R., Hicks, D. M., and Brasington, J.:

Assessment of a numerical model to reproduce event-scale erosion and deposition distributions in a braided river, Water Resources Research, 52, 6621-6642, 10.1002/2015WR018491, 2016.



附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	一、為配合本署業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分： 本計畫以iRIC Nays2DH進行二維數值模擬，除了文獻已證實此軟體之高效性能外，是否可能於模擬實驗中與三維流場模擬進行比較，以證實其性能及實務應用價值？	一、計畫內容部分： 謝謝委員的建議。iRIC Nays2DH 是學界公認、經過多篇 SCI 文章證實，其性能與實用價值無庸置疑(Nelson et al., 2016; Iwasaki et al., 2016; Shimizu et al., 2020)。Nays2DH 之計算效率高，穩定，非常適合用於探討長時間尺度之動床形貌演化過程，符合本研究計畫之目的。而 Nays2DH 與三維動床模擬軟體(例如: Delft3D)之比較可以參考 Schuurman et al., (2016), Weisscher et al. (2019) 及 Weisscher et al. (2020)。本計畫無須再花時間證實 Nays2DH 之適用性。至於三維流場軟體(例如: Flow3D)則較適合計算小範圍、局部之流場分布，是否能計算長時間演化之動床形貌演化、河道與砂洲之互動，或是能否維持計算效率？都與本計畫之主題與目的不符，故本計畫將維持使用 Nays2DH，不考慮使用三維數值模式。

項次	審查意見	回覆辦理情形
2	計畫說明書說明中型動床水槽之建構及活動辯狀指數分析、沙洲幾何分析、沖淤分布分析，應對所欲採用之軟硬體有充分瞭解，計畫可行性高。	謝謝委員的肯定。
3	河道上不安定土砂運移時對下游的影響可能有(一)同一河道、(二)支流流入之河道，這兩種情況，本計畫預計作那一種？	本計畫只考慮同一河道之情境。支流帶入的水砂影響，將會被當作側向邊界條件或形貌條件改變來處理。在實驗及數模方面皆會採用此方法處理。
4	4.5 m長的動床水槽是否足夠完成上述目標？	5 m長的動床水槽可以達到本研究計畫之目標。
5	本研究之實驗渠槽寬深比較大，對於山區河道之上、中游等V型谷河川型態是否適用，再請補充說明。	山區型河川並非所有河段都屬於V型河谷，亦有許多河段是屬於partly confined valley，也會出現寬深比較大的河段。例如：布堂布納斯溪進入荖濃溪之下游河段。此外，本研究使用之水槽亦能模擬confined valley，只需在水槽中建置限制河寬之木板。不過，這種情境與本計畫之主題及目的不符。

項次	審查意見	回覆辦理情形
6	本研究之實驗渠槽坡度涵蓋範圍大，對於後續實驗流況(Flow Regime)設計上，研究探討流況條件為定量流、變量流以及超、亞臨界等何者為主要探討對象，再請補充說明。	此水槽之坡度是刻意設計成涵蓋較大的範圍，可探討不同之研究主題。不過，本計畫只會採用固定坡度作為實驗條件，並專注探討不安定土砂改變河寬的邊界條件如何影響主河道之長期形貌演化與泥沙分布。水流方面則屬於定量流及亞臨界流況。至於變量流及超臨界流況則與本計畫之目的不符。
7	本研究之河川形貌是著重在僅Partly Confined河段部分，或是Laterally Confined, Partly Confined, Laterally Unconfined三者間變化探討，再請補充說明。	本研究計畫將著重在 laterally confined 及 partly confined 之模擬。
8	二、有關計畫書格式及經費審查部分： 1.本計畫請以補助經費745仟元調整編列。 2.本年度執行期限請修正為自113年2月7日至113年12月31日。(10.9個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限10.9個月內編列。年終獎金亦配合計畫期程。	1. 已上系統將補助經費改成745仟元。 2. 已上系統將執行期限請修正為自113年2月7日至113年12月31日，(10.9個月)。 1、已修正執行日期自113年2月7日開始。2、已修正按日按件計資酬金編列，目前低於業務費之35%。此外，本人已調整物品之實驗耗材項目，改為83,793元。3、如本人之第一個審查意見之回覆。

項次	審查意見	回覆辦理情形
9	1、P、1(五)執行期限：本年度計畫自113年1月1日請修正自113年2月7日。 2、按日按件計資酬金編列應低於業務費35%。 3、餘同減災監測組意見。	已修正。



附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	中、英文題目摘要內容似不一致，主題為何？似不明確？宜確認之。	已將英文題目及摘要修正。
2	P.1-2文謂“根據相關法規，不安定土砂進入河道可能對河道的流量與流速產生影響，係何等法規有此規定，宜有法源依據！”	原文中提及的「根據相關法規，不安定土砂進入河道可能對河道的流量與流速產生影響」的表述不夠嚴謹，已於期末報告內文中刪除(P.1-2)。
3	表4-1之 q_w 是什麼？文中似未見註明！	q_w 代表單寬流量，其計算方式為總流量除以主河道之河寬。單寬流量我們在實驗中用來確保每個系列都維持一致的單寬流量，讓比較基礎一致。由於文中沒有特別討論，已將表 4-1 的 q_w 參數刪除，統一採用水砂比來討論。
4	P.4-7，側向沖積扇鋪設高度為0.5公分，該等設計之幾何比例如何決定？又，數值高程之精度為1 mm，與沖積扇厚度之比例是否精度合宜？可否補充說明。	我們已補充說明側向沖積扇鋪設高度之幾何比例及沖積扇厚度之決定方式(參考 P.4-7)。此外，本計畫建置之數值高程之精度為 1 mm x 1 mm x 1 mm，在 x, y, z 方向上的精度都有 1 mm 的精準度。而本實驗鋪設之沖積扇厚度為 5 mm，因此在 z 方向有 1 mm

項次	審查意見	回覆辦理情形
		的數值高程精度是足以有效表現沖積扇厚度的變化。
5	實驗可採流量在流路斷面之水深多少？是否可補充說明。	在辮狀河道中即時的流路斷面水深資料相當難取得。因為辮狀河川的流路型態為多條流路，沙洲也是動態在改變，故本計畫並未量測實驗中各斷面之流量資料。不過，我們有取得入流處及出流處之平均水深約為 3 mm。
6	實驗結果之辮狀河川的形成，能否說明其形成機制？而可採用之流量代表性如何？而所謂之不安定土砂係指何處之土砂，宜詳加說明。	辮狀河道的形成機制在學界有相當多的說法，其中根據 Lane (1957) 的研究，形成辮狀河川的主要原因可歸納為以下兩點：（一）河流所接收的泥沙量超過其能夠輸送的含沙量，導致無法運輸的泥沙在河床上沉積；（二）陡峭的坡度造成寬而淺的河槽，使得水流分散，進而在河中形成浮洲或島灘。 本研究並非在討論「不安定土砂的形成機制」。本計畫是站在主河道的角度，探討當支流集水區之不安定土砂流入主河道後，以「沖積扇」的形式佔據了主河道的流路。比較不同沖積扇佔據河寬之比例，與主河道之不同水砂比的改變，以了解山區型河道受支流沖積扇影響後之自適應泥砂調整過程。

項次	審查意見	回覆辦理情形
7	P.2-3提到將開發自動化辨識沙洲系統，請進一步詳注該系統之訓練模組或訓練集等相關資訊。	有關自動化辨識沙洲系統之細節已於本文的 P.2-3 處進行補充說明，請參考圖 2-4 及 Huang et al. (2023)及 Lai et al. (2024)。
8	P.2-7請再詳述使用之輸砂公式、使用參數的資料。	iRIC 中 Nays2DH 模式所使用之輸砂公式及使用之參數資料已於本文 P.4-72 處補充說明。
9	P.4-4 本計畫之使用定水頭進行試驗，是否可代表天然流量之流況。	本實驗以基礎實驗為主，上游入流量以定量流方式供應，固不可代表天然流量。未來可以設置變流量的上游入流條件，探討其對於辮狀河川形貌的影響。
10	P.4-5提到供砂履帶之作業，試問該履帶以何種量化數值代表天然供砂情形？	該供砂履帶以定量的方式供砂，而砂量是根據過往經驗及多次測試後所訂定能夠在水砂比 60 及 90 的情況下皆能形成辮狀河川的砂量。 本實驗也非「縮尺模型試驗」，無法直接將物理實驗之砂量直接按照某種比例翻譯成天然河川的砂量。我們的實驗是「類比實驗」，尋找的是系統中跨尺度的無因次參數，求的是通用的規則，可以被應用到不同的河川，並非針對特定河川翻譯水量或砂量。

項次	審查意見	回覆辦理情形
11	P.4-7半圓形沖積扇在報告中如何進行尺寸比例的訂定？	半圓形沖積扇的尺寸與實驗中直渠道之寬度相關。三種尺寸之沖積扇，分別對應其半徑與直渠道寬之比值，25%、50%及75%。以此設計三種尺寸之沖積扇。
12	P.4-10提到實驗均使用坡度4度，其度數是否可代表不安定土砂在山坡地之度數？	實驗所使用之坡度4度，並非支流不安定土砂形成的坡度。4度指的是主河道之底床坡度，是根據我們過往的實驗經驗，較適合實驗室尺度辨狀河川形成之坡度。 而不安定土砂在本實驗中，代表的是側向突發的土砂事件發生後，大量土沙堆積在主河道，以沖積扇的形式影響了主河道的發展。本計畫並非在探討不安定土砂的形成山崩或土石流機制。
13	P.4-12請補充表格坡度0.07之單位。	已在本文 P.4-12 處，將表格坡度單位修正為 Degree。
14	實驗中水箱實驗時間的30分鐘與45分鐘依何種依據訂定？	實驗時間 30 分鐘與 45 分鐘是分別測試所得到的最適合本實驗的實驗時間。30 分鐘是本實驗的辨狀河道發展至穩態所需要的時間。而辨狀發展階段後接續 1 階段 45 分鐘的主實驗，共 5 階段。45 分鐘則是為配合側向半圓形沖

項次	審查意見	回覆辦理情形
		積扇的侵蝕速度，故每一組拉長至 45 分鐘，使整組實驗可以看到沖積扇從存在到完全消失對於主河道的影響。
15	P.2-3頁，於圖2-3活動瓣狀指數分析之 t_c 值所代表意義為何，再請補充說明。	t_c 為 critical time，其意義為瓣狀指數到達穩定的時間點。於 t_c 左側的時間段稱為發展段， BI_A 之數值變動較大。位於 t_c 右側的時間段稱為穩定段，瓣狀指數趨於穩定。
16	P.2-10，因上游來砂大於下游輸砂進而形成瓣狀河床型態，該如何調整下游土砂出流量，而不致影響河防安全，再請補充說明相應防治措施。	在主河道受到沖積扇影響的的上游測，因為土砂的交互作用，水砂有可能會因河床墊高，衝擊當地村落，造成生命財產受到威脅。此外，水流撞擊到沖積扇後，水流會延切線方向撞擊沖積扇對岸的河岸，造成嚴重掏刷，該處之防洪措施亦要注意。相關說明請參考本報告 P4-87 至 P4-90。
17	P.4-11頁，目前水砂比設定為60及90兩者，該此兩水沙比如何訂定，是否仍有其他水沙比條件，在請補充說明。	水砂比 60 及 90 為過往實驗經驗中較適合生成瓣狀河川的水砂比。在實驗測試過程中，我們有嘗試水砂比為 30 及 120。可以當水砂比為 30 時，主河道內堆積遠超過侵蝕，導致無法產生瓣狀河川。而在水砂比為 120 之實驗中，主河道內侵蝕遠超過堆積，亦無法產生瓣狀河川。故最終挑選水砂比 60 及 90 為本實驗之實驗條件。

項次	審查意見	回覆辦理情形
18	P.4-23至P.4-28頁，本計畫6組成果之實驗成果，其不同時間點之圖說成果及所代表之意義，再請補充說明。	本計畫 6 組之實驗成果，以八個不同時間點展示。時間點 $T = 0$ 表示實驗尚未開始前的初始地形，而 $T = 1800$ 為瓣狀發展階段結束的地形，而後出現的第二張 $T = 1800$ 則為鋪設完側向沖積扇後所掃描之地形。往後的五個時間點則分別為主實驗每個階段結束後的掃描地形。實驗過程中的重要階段時間為 $T = 0, 1800, 5400, 7200, 9900, 12600, 15300 \text{ s}$ 。



附錄三、期末成果發表會會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	河道坡度及入流 Q 與 Qs 如何設計?	本實驗研究中之河道坡度是參考過去本研究團隊成功之實驗案例，底床坡度為 4 度。入流 Q 與 Qs 則是本實驗依照實驗現象試驗出來的大小。本研究則是採用控制水砂比(Q/Qs)的方式進行討論。而水砂比的設定則是參考 Lai et al. (2017)、Huang et al. (2023)及 Lai et al. (2024)等期刊論文進行設定。
2	若使用 Rice 以外的模式，成果的差異性會有多大?	本研究在進行數值模擬前，有先進行參數檢定，將不同曼寧 n 值模擬出來的成果與實驗成果比較，差異性如 p.4-74 及 p.4-75 所示。結果顯示 Rice (1998)所模擬出來的結果與實驗最接近。因此本研究採用 Rice 之經驗公式進行後續的數值模擬。
3	土砂改變河道寬度會影響多久?是否可以評估試驗中河道恢復穩定狀態所需的時間?	以目的前實驗結果進行評估，A 系列(Q/Qs = 60)，沖積扇佔據河寬比例(r/B)為 25%時，河道恢復穩定狀態需 3 小時；r/B = 50%時，河道恢復穩定狀態需 3.75 小時；r/B = 75%時，河道恢復穩定狀態需 4.5 小時。而 B 系列(Q/Qs = 90)，沖積扇佔據河寬比例(r/B)為 25%時，河道恢復穩定狀態需 2.25 小時；r/B = 50%時，河道恢復穩定狀態需 3 小時；r/B = 75%時，河道恢復穩定狀態需 3.75 小

項次	審查意見	回覆辦理情形
		時。
4	本計畫成果在水保業務上可以如何應用?建議加入現地資料做驗證。	本研究可能可以類比荖濃溪受到玉穗溪支流沖積扇影響之情況。但本研究並非按照特定案例進行縮尺實驗之研究。依照成果報告 p.4-87 至 p.4-90 之土砂災害影響範圍之推估結果，第一，建議在支流沖積扇之上游側，應注意底床堆積進而讓水流切穿沖積扇之災害。第二，建議在支流沖積扇之對岸區域，注意河道被迫轉向所產生之沖蝕現象，應加強護岸範圍及強度。
5	建議針對河道發展歷程與應推動的治理行為進行論述，並納入報告中。	已將河道發展歷程與應推動的治理行為之論述納入報告之中(p.5-1)。