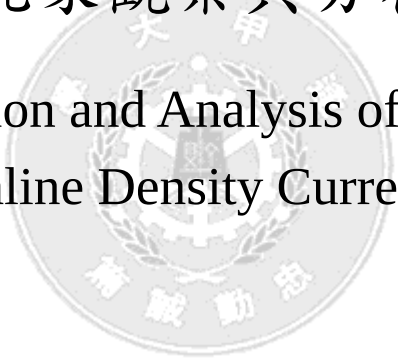


逢 甲 大 學
水 利 工 程 學 系 碩 士 班
碩 士 論 文

變量鹽水異重流實驗之
現象觀察與分析

Observation and Analysis of Unsteady
Saline Density Currents

The seal of Feng Chia University is a circular emblem. It features a central gear-like design with a star above it. The words "FENG CHIA UNIVERSITY" are written in English around the top inner edge, and "逢甲大學" is written in Chinese around the bottom inner edge. The outer ring contains the motto "勤 誠 敬 忠" (Diligence, Sincerity, Respect, Loyalty).

指 導 教 授：許少華
研 究 生：蔡宗憲

中 華 民 國 九 十 三 年 九 月

摘要

水庫淤積一般在颱風暴雨時才有較大的泥沙入流量，而颱風暴雨挾帶泥沙流入水庫是變量入流的。本文的研究重點為觀察變量入流情況下異重流的傳播特性，並與定量入流情況比較。乃利用長約 42m、寬約 10cm、坡度為 0.02 的可視化流槽進行變量入流的鹽水異重流實驗，入流量乃用電腦設定數個階梯流量訊號輸出，然後以 DV 拍攝觀察潛入點移動、異重流頭端及身體的變化。結果顯示潛入點移動與密差福祿數相關，當 $F_p = 1.0F_p$ 時代表潛入點可移動的最遠處，而 F_p 由高至低與 F_p 由低至高的過程會滿足不同的潛入水深，具不可逆性。而異重流頭端隨入流量變化也會有立即性的流速增減發生，程度會因距入流處的距離而有所改變。另外，本文也歸納入流量變化的臨前條件為有基流與無基流情況，在無基流狀況下變量入流的增量，會快速傳遞往下游方向，最後受阻於異重流頭端，並積聚於頭端附近。

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate unsteady density currents, because movement of density currents is unsteady during a torrential rain. A series of experiments were observation and analysis unsteady saline density currents, the experimental setup is easy look channel, the length is 42m, the width is 0.1m, an inclination 0.02. Used computer output a series of discharge data, and used DV get saline density currents film, observation plunging point, the head of density currents, and the body of density currents. The results of experiments show plunging point move corresponding densimetric Froude numbers, $F_p=1.0$ when plunging point moving in the extreme, F_p from high to low or from low to high has differ plunging point, irreversible. The head velocity of density currents is corresponding inlet discharge and inlet distance, behavior quickly. In the study unsteady flows occur in base flows or without base flows, if without base flows, unsteady flows move to the head of density currents quickly, to clog up and follow the head of density currents.

目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
符號說明.....	IX
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究動機.....	2
1-3 研究項目.....	3
1-4 論文大綱.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
第三章 實驗設備與方法.....	7
3-1 實驗設備.....	7
3-1-1 實驗渠槽.....	7
3-1-2 進水系統.....	7
3-1-3 尾水箱.....	8
3-1-4 濃度量測儀器.....	9

3-1-5	現場觀測設備.....	9
3-1-6	變量控制設備.....	10
3-1-7	實驗耗材.....	13
3-2	實驗檢測.....	13
3-2-1	渠槽形狀.....	13
3-2-2	電導度計率定.....	14
3-2-3	DV 攝影.....	14
3-2-4	變量控制.....	15
3-3	實驗流程.....	15
3-3-1	實驗流程.....	15
3-3-2	實驗技巧.....	18
第四章	實驗結果與分析.....	20
4-1	濃度剖面.....	20
4-2	異重流頭端.....	20
4-2-1	定量異重流.....	20
4-2-2	變量異重流.....	21
4-2-3	頭端移動特性.....	23
4-3	異重流身體.....	25
4-3-1	有基流情況.....	25

4-3-2	無基流情況.....	25
4-3-3	異重流厚度變化.....	26
4-4	潛入點.....	27
4-4-1	變量流潛入點實驗.....	27
4-4-2	潛入點變化.....	28
4-5	數值模擬.....	28
4-5-1	模式輸入條件.....	29
4-5-2	模擬結果.....	30
4-6	密差福祿數分析.....	33
4-7	波速分析.....	35
4-8	總量分析.....	37
4-9	頭速分析.....	38
4-9-1	入流量與頭速定值.....	38
4-9-2	入流量與距離.....	39
第五章	總結.....	40
5-1	結論.....	40
5-2	建議.....	41
參考文獻		42

圖目錄

圖 1-1	異重流型態.....	44
圖 2-1	范(1959)變量異重流水槽試驗量測之異重流厚度歷線.....	44
圖 2-2	定量鹽水異重流示意圖.....	45
圖 3-1	實驗渠槽俯視圖.....	45
圖 3-2	進水系統示意圖.....	45
圖 3-3	進水系統立體圖.....	46
圖 3-4	儀器開關示意圖.....	46
圖 3-5	控制面板示意圖.....	46
圖 3-6	尾水箱示意圖.....	46
圖 3-7	電導度計示意圖.....	47
圖 3-8	DV攝影機示意圖.....	47
圖 3-9	PCL-711B 介面卡示意圖.....	47
圖 3-10	Advantech VisiDAQ 視窗示意圖.....	48
圖 3-11	虹彩傳輸器示意圖.....	48
圖 3-12	電極端的線路配置.....	48
圖 3-13	電導度與鹽水濃度關係圖.....	49
圖 3-14	電壓與流量關係圖.....	49
圖 3-15	起始條件示意圖.....	49
圖 3-16	範例流況.....	50
圖 3-17	實驗流程圖.....	51
圖 4-1	定量異重流之濃度垂直剖面.....	50
圖 4-2	不同濃度對頭速變化的影響(定量流).....	52
圖 4-3	不同流量對頭速的影響(定量流).....	52
圖 4-4	三種流況的入流量歷線.....	53

圖 4-5 頭端到達時間與距離關係圖(目視記錄頭端移動).....	54
圖 4-6 頭端速度趨勢圖(目視記錄頭端移動).....	54
圖 4-7 符號定義圖.....	54
圖 4-8 流量歷線.....	55
圖 4-9 頭端到達時間與距離關係圖(DV 攝影).....	56
圖 4-10 頭端速度趨勢圖(DV 攝影).....	56
圖 4-11 變量異重流歷時厚度歷線(有基流).....	57
圖 4-12 定量異重流的厚度歷線(無基流).....	57
圖 4-13 變量異重流的厚度歷線(無基流).....	57
圖 4-14 定量異重流潛入點移位歷程.....	58
圖 4-15 潛入點歷線.....	59
圖 4-16 模擬與實驗入流歷線.....	58
圖 4-17 模擬厚度歷線與實驗值比較圖.....	60
圖 4-18 模擬之濃度歷線.....	60
圖 4-19 模擬之流速歷線.....	60
圖 4-20 實驗之波形變化.....	61
圖 4-21 模擬之波形變化.....	61
圖 4-22 潛入點與 F_p 關係圖.....	62
圖 4-23 波形簡化成梯形.....	62
圖 4-24 不同流量頭速歷線.....	63
圖 4-25 頭速公式示意圖.....	63

表目錄

表 3-1	實驗渠道的寬度與坡度.....	64
表 3-2	影片與碼表時間關係.....	65
表 3-3	電壓與流量對應表.....	65
表 4-1	三種流況的實驗記錄(目視記錄頭端移動).....	65
表 4-2	變量異重流頭端到達時間記錄(DV 攝影).....	66
表 4-3	變量異重流歷時厚度記錄表(有基流).....	71
表 4-4	變量異重流歷時厚度記錄表(無基流).....	78
表 4-5	變量異重流潛入點歷線記錄.....	84
表 4-6	不同入流量之頭速記錄.....	88



符號說明

$\bar{C}$ ：異重流體積濃度，因次[-]。

$\bar{C}_p$ ：沉滓平均濃度，因次[-]。

c_p ：密差波速， $[LT^{-1}]$ 。

F_p ：密差福祿數，因次[-]。

g ：重力值， $[LT^{-2}]$ 。

g'_p ：密差重力值， $[LT^{-2}]$ 。

H_p ：潛入水深， $[L]$ 。

h ：異重流基流厚度， $[L]$ 。

I ：流量比值，因次[-]。

Q ：流量， $[L^3T^{-1}]$ 。

q_0 ：基流量， $[L^2T^{-1}]$ 。

q'_p ：巔峰流量， $[L^2T^{-1}]$ 。

q_p ：單位寬度流量， $[L^2T^{-1}]$ 。

R_i ：Richarson Number，因次[-]。

s ：沉滓比重，因次[-]。

T_u ：入流量開始變量時間， $[T]$ 。

T_b ：變量累積時間， $[T]$ 。

T ：累積時間， $[T]$ 。



$\bar{u}$ ：為異重流基流平均流速， $[LT^{-1}]$ 。

V ：流速， $[LT^{-1}]$ 。

x ：距進水口距離， $[L]$ 。

α ：為頭速消減率，因次 $[-]$ 。

θ ：渠道坡度，因次 $[-]$ 。

Δ_s ：比重差異，因次 $[-]$ 。



第一章 緒論

1-1 前言

在自然界的水循環過程中，流動是一項相當重要的機制。水由液體汽化成體積較大密度較小的水蒸氣，因此可移動至較上層的空間。相對的，水蒸氣也可因固化或液化作用變成體積較小密度較大的冰或水，進而移動至較下層的空間。水循環過程中除了因液相、氣相、固相的轉變而產生流動外，還包括了同相間的流動。就液相而言，當兩種(或兩種以上)比重相差不大且可以相混的流體，因比重的差異，使得比重較大的流體潛入比重較小的流體下，且受重力作用而運行者，稱之為異重流(gravity currents)。

異重流若依流入水體的位置可分為：表層異重流、中層異重流及底層異重流。當入流流體密度小於水體時，因其比水體輕，故入流流體會浮於水體之上而形成表層異重流(如圖 1-1(a)所示)；當入流流體密度大於水體時，因其比水體重，故入流流體會潛入水體之下沿底床移動而形成底層異重流(如圖 1-1(b)所示)；若水體本身已有分層，且入流流體密度介於水體某一分層密度時，因重力作用故使入流流體潛入水體某一分層中而形成中層異重流(如圖 1-1(c)所示)。

異重流依比重差異的成因可分為：溫度異重流(例如，海洋洋流)、溶解質異重流(例如，河口與海交界處鹽水與清水間的流動)及混合質

異重流(例如，一場大雨挾帶泥砂流入水庫、湖泊或海的渾水異重流(turbidity currents))等。

台灣因地形、地質的影響，優良壩址有限，且多已建壩。近年國內民眾尊重自然生態的環境意識升高，對於阻絕上游與下游的水壩，大多不支持新建。為維持現有水庫功能，以達到水資源永續利用目的，需要減少水庫淤積。上游集水區的泥沙主要是在洪水的帶動下大量流入水庫，在進入水庫迴水區之前都是在整個通水斷面流動的。進入水庫迴水區之後，由於流速變緩，且渾水密度較大之故，在某一通水斷面之密差福祿數達 0.6-1.0 時，渾水發生潛入，形成渾水異重流運行至壩址，釐清異重流特性有助於排出渾水，以達到蓄清排渾減少水庫淤積的目標。水庫中需要重視的變量異重流發生在颱風暴雨時期，這種異重流的傳播特性尚未被瞭解，也正是本文的研究重點。

1-2 研究動機

由於定量異重流行進一段短距離即穩定，不但能減少實驗時間且也容易在有限的空間下完成，所以現有文獻多探討定量異重流。唯現場真實發生的是變量異重流，若要更貼切的敘述自然界的異重流現象，勢必要將變量流研究納入考量。

考量進行變量流研究有二項前提，第一為能控制流量隨時間變化，在本研究實驗中將配合套裝軟體與電腦硬體設備控制流量變化；

第二項前提為需要有較長的實驗渠道，因為流量變化的影響可能須要一段長時間的作用才會完全發展，所以要有比一般定量流實驗更長的渠道，始能觀察到流量變化的完整影響。本研究係延續一系列多年的異重流研究，在試驗控制上已能做到高品質要求，使用之實驗渠道長達 42.8m，較一般定量流實驗渠道(約 10~20m)長 2 倍，故有機會可完整觀察流量變化的影響。基於此二項前提的突破加上對研究的熱忱，於是嘗試挑戰變量異重流的研究。

1-3 研究項目

研究項目有三部分，一為鹽水異重流頭端移動歷線，二為固定斷面的鹽水異重流厚度歷線，三為鹽水異重流的潛入點移動歷線，詳細內容將於本文中第四、五章說明。

1-4 論文大綱

全文共分六章，敘述如下：

第一章為緒論，介紹異重流的定義、研究動機、項目及全文的架構。

第二章為文獻回顧，介紹異重流相關實驗、研究文獻。

第三章為實驗設備與方法，敘述實驗儀器與率定結果、實驗流程等。

第四章為實驗結果與分析，敘述實驗的結果與意義。

第五章為總結，針對實驗結果做結論並提供往後研究者一些建議。

第二章 文獻回顧

在以往的異重流研究中，研究範圍雖然包括有鹽水異重流、泥砂(渾水)異重流、溫度異重流的現象觀察、數值模擬、潛入特性研究、排水特性研究、沉降特性研究等，但大多可將其歸類為定量異重流的特性研究，以水槽試驗研究定量異重流的有：Ellison and Turner (1959), Ashida and Egashira (1975), Alavian (1986), Garcia (1993), Lee and Yu (1997)；以一維數值模式研究定量異重流的有：Akiyama and Stefan (1985), Fukushima et al. (1985), Buehler and Siegenthaler (1986), Parker et al. (1986), Yu and Lee (1993)。在真實的自然流況下，異重流應是以變量型態出現，變量異重流以往的研究，著重上游是非持續供應，所產生的變量異重流 (Simpson, 1997, chapter 12)。例如密度不同的兩種流體分置水槽兩邊，中間以隔板分開，移走隔板將使兩種流體發生異重流，這種變量異重流稱為 lock exchange flows；此外，另一種情況是在水槽上游供應一個固定總量的較高密度流體，此流體釋放後產生變量異重流。以數值模式研究變量異重流的有范等(1959)以特性線圖解法模擬一維變量異重流、黃與范 (1987) 以四點隱式差分法配合下游虛擬零邊界建立一維變量異重流模式、呂 (1988) 以四點隱式差分法配合呂 (1984) 建立之孔口出流公式建立一維變量異重流模式、Hsu et al. (1997) 不考慮下游邊界條件以 MacCormack 法建立一維變量異重流模式、De Cesare et al. (2001)建立三維變量異重流模式，模

擬 Luzzone 水庫，提出變量異重流的流速歷線沿程衰減。

范等(1959)根據官廳水庫實測非恆定異重流之厚度，提出：異重流變量性質隨水庫的長度加長而有所減弱，距離愈長，愈趨於恆定。既有文獻僅有范等(1959)進行過水槽試驗，范(1959)進行變量異重流水槽試驗，實驗水槽長 50m、高 2m、寬 0.5m，水槽坡度 0.0005，為磚砌水槽，邊壁與底床皆為洋灰粉光表面。試驗懸沙級配 D_{50} 的粒徑約為 0.0025mm， D_{90} 的粒徑約為 0.02mm。圖 2-1 是一組試驗在 $x=0m$, 15.2m, 24.7m 目視獲得異重流厚度歷線，觀測時間間隔為 30 秒~60 秒，入流泥沙濃度保持 5.2 kg/m^3 ，水流自底孔流出，壩址水深 0.7m，本文推估入口水深 0.675m。圖 2-1 顯示異重流往下游洪峯衰減，但是並無趨於定量流的情況。范等(1959)、黃與范（1987）、呂（1988）皆以數值模式模擬一維變量異重流，皆以范(1959)的試驗數據驗證，並未提出更多變量異重流的特性。

前述說明指出文獻中並無充分資料可釐清變量異重流的特性，所以本文分別進行定量異重流與變量異重流實驗，再加以比較，比較的项目有①異重流頭部速度、②異重流厚度歷線與③潛入點移動特性。定量異重流潛入點在入流開始時會快速移動，之後漸緩，直至穩定不動，當密差福祿數 $F_p \approx 1$ 時發生潛入， $F_p \approx 0.6$ 時潛入點不再移動(俞維昇, 1991)， $F_p = (q_p^2 / g'_p H_p^3)^{1/2}$ ，式中 q_p 為單位寬度流量， H_p 為潛入

水深， $g'_p = (s-1)g\bar{C}_p$ ， s 為沉滓比重， $\bar{C}_p$ 為潛入斷面的沉滓平均濃度。

本文將以實驗數據探討變量異重流的潛入點移動與定量異重流的差異。以鹽水為例，當開始入流時，鹽水推擠清水往渠槽下游移動，接著鹽水潛入清水層之下，鹽水開始潛入清水下的那個位置稱之潛入點，如圖 2-2 所示。當鹽水潛入清水層下運行時，會於前端產生較大的渦流，造成前端形狀類似不對稱的橢圓形，一般稱之異重流頭部，在異重流頭部之後的部份稱為異重流的身體，另外，頭部的渦流會捲入上層的清水，混合後會產生濃度介於清水與入流鹽水之間的流體，稱為混合層。定量異重流的文獻皆指出頭部移動速度與異重流身體厚度，在很短距離內皆會達到一定值，本研究將以實驗數據探討變量異重流的頭部速度與身體厚度之變化歷程，並與本研究之定量異重流實驗比較，以同一實驗水槽比較變量異重流與定量異重流方能釐清其差異。

第三章 實驗設備與方法

3-1 實驗設備

3-1-1 實驗渠槽

實驗渠槽的俯視圖如圖 3-1 所示，呈匚字形，渠道全長約 41.2m、寬 10cm，坡度約為 0.02。渠道設計方面，上方無蓋為自由液面，兩側及下方則為透明玻璃，故可觀察流況演變；緊鄰進水口的第一直線段長約 14.42m，其後接著一個弧長約 2.43m 的第一彎道段，在彎道後又接第二直線段長約 7.6m，之後接第二個彎道段弧長約 2.37m，最下游是第三直線段長約 14.42m 接尾水溢流箱。

實驗渠槽的底座是由數個可供旋轉調整的鋼鐵支架所架起，故可藉由調整旋轉支架來產生不同坡度進行實驗，本文只進行坡度 0.02 的試驗。

3-1-2 進水系統

實驗渠槽的進水系統由伺服器、定水頭箱、攪拌箱(鹽水調配槽)、三個馬達及輸水管路所組成，如圖 3-2 及圖 3-3 所示。

①伺服器：是控制進水的主要儀器，連接三個馬達，第一個抽水馬達負責將攪拌箱內的鹽水抽至定水頭箱，第二個伺服馬達則將定水頭箱內的鹽水抽至實驗渠槽，最後一個馬達則用來轉動攪拌箱內的螺旋槳。伺服器包含有儀器開關及控制面板，伺服器最外層是所有儀器

的開關(如圖 3-4 所示)，操作步驟為先轉總開關到 on 位置→扳起伺服馬達啟動鈕到 on 位置→壓下攪拌器、伺服馬達、抽水馬達的 on 按鈕(在做此動作前，定水頭箱及攪拌箱內須存有充足的液體，避免馬達處於空轉狀態)。於伺服器內部是控制面板(如圖 3-5 所示)，為設定抽水量的地方，操作步驟為按下 鍵表示以本機來控制鹽水的抽送量(這裡只能設定量)→接著輸入數字鍵後按 write 設定抽水馬達的頻率→最後按 FWD 鍵開始抽水→停止抽水則按 STOP 鍵。

②定水頭箱：長 1.1m、寬 0.4m、高 0.225m，其功能為使伺服馬達在抽送鹽水期間能保持穩定的水頭差。

③攪拌箱：長 1.8m、寬 1.1m、高 1m，可容納鹽水的容積為 1.78m^3 ，為儲存並攪拌調配均勻濃度鹽水之用，攪拌箱內有一弧形構造物正對著螺旋槳，當螺旋槳啟動時可使產生迴轉水流，達到攪拌鹽水使濃度均勻之效。

3-1-3 尾水箱

在渠槽末端連接有一長約 1.6m、寬 0.4m 的尾水箱(如圖 3-6 所示)，其與渠槽末端是平滑漸擴的接通，內部渠道呈 C 型，導引鹽水(異重流)順流往下，底部出口設有水閥可控制出流量，其功能在排除到達尾水箱的鹽水，使下游鹽水的迴水壅高現象減慢，以增加不受下游迴水影響之實驗可觀測時間。除此之外，尾水箱尚設有溢流孔及清水

補注管線；溢流孔用以排除多餘清水，使整個實驗過程的尾水箱處於固定總水位狀態。清水補注管線則可配合水閥的鹽水出流量，適度的調整清水補注量，使溢流孔維持少量溢流，達到延長實驗時間的效果。

3-1-4 濃度量測儀器

如圖 3-7 所示，鹽水濃度量測儀器是德國製 WTW LF330 型號的手提式電導度計，精確度達 $\pm 0.01 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。基本操作說明如下，首先將測針放入液體中，液體須淹沒測針中空的區域，然後按 on/off 鍵，開啟或關閉電源，當開啟電源時會先顯示測量單位然後再顯示量測值及當時溫度，再按 可選取測量單位，分別為 0.1、0.01、0.475 (內定值) 及 1.3 ~ 0.45 (自定值)，單位是 [1/cm]，按 可選取量測值的顯示格式，分別是 [mg/L]、[$\mu\text{S}/\text{cm}$]、[ms/cm] 的顯示格式。

3-1-5 現象觀測設備

實驗現象之觀察是以 DV 攝影機拍攝(JVC 型號 GR-DVL805)，如圖 3-8 所示，其擁有 3.5" 的液晶螢幕，可即時觀看到拍攝畫面。在機體右後方有一個轉盤式的功能鍵，當轉盤指示在 OFF 位置時表示關機狀態，若轉至 PLAY 時，可配合機體左上前方的撥放鍵進行已錄影片之撥放、快轉及暫停顯示；若將功能鍵轉盤轉至 時，表示可使用錄影功能，此時只要再按下功能鍵轉盤中央的紅鈕即開始錄影，按

第二次即結束錄影。另外於錄影動作下可利用機體右上後方的遠近轉軸與亮度轉軸，進行取景大小及畫面光暗的調整。須注意在移動拍攝及遠近、亮度調整時，機體會因自動聚焦而出現短暫模糊畫面，此為正常情況。

3-1-6 變量控制設備

實驗中為了使進水口處的流量能隨時間變化，須另裝備電腦及 Advantech 組件(包含 PCL-711B 介面卡、驅動程式、Advantech 套裝軟體及虹彩傳輸器)。其中電腦採用一般個人電腦的規格即可，而 Advantech 組件則是特別為變量控制而設，細節如下：

①PCL-711B 介面卡：如圖 3-9 所示，將其安裝於電腦主機的擴充槽上，之後灌驅動程式(介面卡附贈光碟 Advantech Drivers Supporting for Industrial Automation 裡可找到)即可。若此裝置與主機上其它裝置衝突時，可於介面卡上調整 I/O 位址，共 6 個調整扳鈕，往數字方向扳動代表有值，反向代表無值，採 16 進位計算，出廠時的設定為 1、5 有值，即 $(1 \times 0 + 2 \times 1 + 4 \times 0 + 8 \times 0) \times 10 + (1 \times 0 + 2 \times 1) \times 100 = 220$ ，I/O 位址為 220-22F，本實驗主機無其它裝置衝突，故此處沒調整。

另外在介面卡下方中央處有電流負載區，可供調整電流大小而產生不同電壓，較下方處若接通，可負載電流能產生最大 10V 的差異。出廠時的設定是接通上方的線路，其負載電流能產生最大 5V 的差

異，本實驗此處無調整，故負載電壓為 5V。

②Advantech 套裝軟體：同樣可在介面卡附贈光碟 Advantech Drivers Supporting for Industrial Automation 裡可找到，軟體灌好之後可在[開始]功能表的程式集裡看到 Advantech Driver for 95 and 98 與 Advantech VisiDAQ 這二項下拉式功能表；Advantech Driver for 95 and 98 及 Advantech VisiDAQ 下拉式功能表裡的 Device Installation 可設定實驗渠槽伺服器的驅動項目，首先在 I/O Device Installation 表單裡新增一個 PCL-711 I/O=220H 的項目，點入此項目將 Base Address 的空格填入 220(對應 PCL-711B 介面卡的 I/O 位址)，選取 D/A Voltage Reference 為 0 ~ 5V(對應 PCL-711B 介面卡的負載電壓)，之後按 OK 完成渠槽伺服器的驅動設定。

在 Advantech VisiDAQ 下拉式功能表裡的 VisiDAQ Builder 項目是設定流量變化之處，係簡單的圖示操作模式。如圖 3-10 所示，左方為圖示功能表，右方為工作表。於開啟一個全新的檔案時工作表是空白的，須將左方的圖示點拖曳至工作表，這時工作表才會出現拖曳的物件，本實驗僅用到 4 項圖示功能。首先點拖曳圖示功能表中央往下第六個圖示(表示資料的讀取)，接著點拖曳圖示功能表中央往下第二個圖示(表示資料的輸出)，之後點拖曳圖示功能表中央的第一個圖示(表示聯結二個物件，第一點為來源，第二點為終點)，最後點拖曳

圖示功能表第一排的箭頭圖示，可進入各物件中修改物件資料。

於資料讀取物件上可修改讀取檔案的路徑；於資料輸出物件上須將 Derive 的欄位調成 PCL-711 I/O=220H，而 Update Rate 的欄位表示輸出訊號的頻率，本實驗是設為 1(每秒輸出一個訊號)。修改完成後只要選擇上方文字功能列的 RUN 選項即可傳送訊號，點 STOP 即停止傳送訊號。

③虹彩傳輸器：如圖 3-11 所示，是聯結渠槽伺服器與電腦主機的設備，其接收端是接至 PCL-711B 介面卡上，電極端則接至渠槽伺服器上。將渠槽伺服器的控制面板拆卸後可見數組電線接路，如圖 3-12 所示，第一排的第 6、7、8 個接路是可用的，因為 PCL-711B 介面卡上我們設定的負載電壓為 5V，故電極端正極接第一排的第 7 個接路，負極接第一排的第 8 個接路(若設定的負載電壓為 10V，則負極接第一排的第 6 個接路，正極不變。)

最後是設定渠槽伺服器(參照圖 3-5)，按 SET 鍵輸入 79 後會顯示數字 0，輸入 4 後按  及 Write 鍵則顯示數字變為 4(第 79 項功能的設定是更改訊號來源，0 表示訊號是伺服器本身提供，4 表示訊號是外部傳來)，至此變量控制設備已安裝完成，不過在操作順序上，是先執行 Advantech 軟體，讓訊號輸出，然後再按控制面板上的 FWD 鍵進行抽水。

3-1-7 實驗耗材

本實驗除消耗大量清水外(抽用地下水)，主要耗材還有 DV 片、普通精鹽及食用色素。DV 片係供拍攝實驗流況之用，一片可拍 60 分鐘；普通精鹽是供調配鹽水之用，鹽之比重約 2.165，一次實驗約須消耗 5kg 的鹽(市價約 70 元新台幣)；食用色素則供做鹽水染料，因為鹽水與清水都無色，不易觀察故添加染料區別之，本實驗染料的規格有紅色食用色素 6 號及黃色食用色素 4 號。

3-2 實驗檢測

3-2-1 渠槽形狀



實驗渠道寬約 10cm，坡度約 0.02，指的是整體代表寬度及整體代表坡度，實際上渠道的細部仍有些微差異。表 3-1 列出渠道三個直線段的寬度與坡度，其中距離表示的是觀測點與進水口處($x=0m$)的距離；寬度表示的是渠道內部寬度(即可容流體通過的部份)，寬度只有第一直線段有記錄。坡度的量測方式，先在渠道內注滿至一定高度的清水，待水面靜止後量取各觀測點水深，利用鄰近二點的水深與距離資料即可算出坡度。

由寬度看來各觀測點的差異最大約差 0.3cm，寬度的代表值應改為 10.2cm 才合理，在坡度方面雖然部份區域坡度值略高(0.026)或略

低(0.013)，整體上多數坡度仍是 0.02，所以坡度代表值仍採用 0.02。

3-2-2 電導度計率定

電導度計率定方式是先以量杯混入已知重量的鹽與已知體積的清水，待攪拌均勻後以電導度計量測。由已知重量的鹽與已知體積的清水可求得混合均勻後鹽水的濃度，如此記錄下數組資料可得電導度與鹽水濃度關係圖如圖 3-13 所示。圖中圓圈與實線分別為本研究實測的資料與線性趨勢線(鹽水重量濃度 $=0.0265 \times \text{電導度} - 0.2316$)，虛線是徐小微(2002)求得的趨勢線，是二次的趨勢線關係。

在濃度大時兩條趨勢線有些微差異，因為當初徐小微(2002)所做的電導度計率定範圍，約是由 0~1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，故其求得的趨勢線公式是代表 0~1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 整體的範圍，本研究只需要率定 0~300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，所以趨勢線是有些微差異存在。

3-2-3 DV 攝影

實驗初期以人員目視方式記錄異重流厚度與頭速，容易因人為誤差使記錄不實，而且實驗過後也只能用記錄下的資料來推測當時的情況，存在不確定性。有鑑於此，之後的實驗便皆以 DV 攝影機拍攝，然後再從影片讀取所須資料，因為拍攝的影片本身會有時間顯示，所以可利用來換算異重流行進的時間。基本上影片所顯示的時間關係跟

實際時間關係一致，但為了證明仍是做了以下實驗，以 DV 攝影機拍攝碼錶讀數，結果如表 3-2 所示，影片時間跟實際時間關係是一致的。

3-2-4 變量控制

在變量控制儀器的測試上，首先按照 3-1-6 節所述，將所有設備皆裝置完成，然後把伺服器所設的流量頻率改為 0(即無流量)，但電腦軟體上設置 0.2v(有流量)，最後啟動裝置證實有水流出，表示此時是以電腦輸出值為主。

流量率定方式是分別設定不同的恆定電壓進行觀測，然後記錄攪拌箱水位下降高度與時間(用來換算流量)，如此可點繪出電壓與流量關係如圖 3-14 所示，其結果與陳禹志、洪旺輝(2003)的率定結果差不多，因為這裡能設定的電壓有限，故實驗中電壓與流量的關係就直接對照表 3-3 所示的整數值(電壓設定最小單位為 0.1V，範圍由 0~1.5V 左右皆可設定，不過 1V 以上的電壓容易使機器的保險絲燒掉，所以不建議使用)。

3-3 實驗流程

3-3-1 實驗流程

本實驗在一個坡度為 0.02 的可視化渠槽下進行，渠槽尾水箱設有溢流孔，可保持槽內水位在某一固定高度。實驗開始前先以清水沖

洗渠槽數次，並將沖洗過的污水放流，之後便正式進行實驗。實驗流程共分四大步驟，敘述如下。

①起始條件配置：實驗開始時，先將尾水溢流箱的水閥關上，接著由尾水箱引入清水，使填滿整個實驗渠槽至溢流孔高度為止，此時渠槽內只能利用溢流孔將多餘之水排出，故總水頭能保持一定(每次實驗皆記錄下清水的電導度約 $7\mu S/cm$ 與距離進水口 10cm 處的水深約 9.3cm 資料，做為日後對照之用)。在沒有入流與出流情況下的狀態，水流幾乎處於靜止，水質純淨無混雜其它物質，底床坡度 0.02，若不考慮彎道，將渠槽拉直則模擬的起始條件如圖 3-15 所示。

②入流液體配製：在完成①的工作後，接著便開始進行入流液體的調配工作，在進水系統的攪拌箱內注入清水至固定高程，再加入設計用量的普通精鹽，接著啟動攪拌器使鹽與水能均勻混合，我們可以目視攪拌箱內是否仍殘留有鹽粒與量測攪拌箱內數個位置的電導度來判斷鹽水是否混合均勻，假如攪拌箱內無鹽粒殘留且量測出數個位置的電導度皆一致，則可視其為均勻鹽水。當調配出所要的均勻鹽水後便可加入染料，加染料的目的在使清水與鹽水有所區分方便觀察，其添加量不影響均勻鹽水的濃度(每次實驗皆記錄下均勻鹽水的電導度)。基於鹽水的沉澱作用小且濃度調配較易均勻，所以採用鹽水而非含沙渾水，較容易釐清異重流特性。

- ③入流歷線控制：依序完成①、②的步驟後，接著就是入流歷線的控制，入流歷線大致按照 3-2-4 節所述的變量控制方式進行，唯一要更改的是 Advantech VisiDAQ 下拉式功能表裡 VisiDAQ Builder 項目的讀取資料部份，這部份我們設置其連結為一個 a.txt 的電子文件檔，只要在 a.txt 的電子文件檔中依序輸入數字便可，這裡要輸入的是每秒要輸出的電壓值，電壓值所對應的流量則如表 3-3 所示，例如我們要設計一個如圖 3-16 的流況，則要在 a.txt 的電子文件檔中依序輸入以下數字。



- ④實驗觀察：完成以上步驟，接著就是實驗現象之觀察，皆先以 DV 攝影機拍攝，影片拍攝方式大致分二類，一類是定點觀察，針對某特定斷面架設固定位置的攝影機，觀察該斷面厚度歷時變化；另一類是移動觀察，攝影機跟隨鹽水異重流頭端移動拍攝，觀察沿程各斷面的頭端到達時間。在開始施放入流鹽水時，即記錄下起始拍攝時間，拍攝完成後將影片轉成 mpeg 檔儲存，並利用當時記錄下之起始拍攝時間換算出正確的入流時間。由固定位置的攝影機所拍攝

的影片中可讀取到不同時間的鹽水異重流厚度，由移動位置的攝影機所拍攝的影片中可讀取到鹽水異重流頭端所在位置及到達時間等資料。

實驗流程圖如圖 3-17 所示，每次實驗的流程皆是先清洗渠槽，然後按照步驟①~④的順序進行，當完成實驗後再清洗渠槽一次並收拾儀器。不同的實驗差異將在步驟②與③有所不同，例如要觀察不同濃度對鹽水異重流的影響，則步驟①、③、④不變，僅步驟②調整。若是要觀察不同流況的變化，則步驟①、②、④不變，僅步驟③調整。

3-3-2 實驗技巧

每個實驗都有許多要考量的地方，考量再周詳也難免有疏忽之處，本節整理一些細部操作經驗如下：

①入流歷線的輸入：因為在入流歷線控制上需要先啟動電腦軟體再啟動伺服器抽水馬達，這樣鹽水才會開始入流到實驗渠槽，故當啟動電腦軟體時，先前設定的入流量歷線訊號已經開始執行，之後啟動伺服器抽水馬達時，其接受到電腦軟體的訊號可能是由入流量歷線的第 3 秒訊號開始。故在入流歷線的輸入上，我們會在前面 10 秒設定為 0(入流量為 0)，讓入流歷線的訊號能完整傳到伺服器上，所以實驗流程上要另用碼錶記下開始放流的時刻。

- ②鹽水入流：鹽水由攪拌箱到實驗渠槽之間是用一條水管連結，此水管會殘留部份前次實驗的流體，故實驗前須先放流一些本次實驗所調配出的均勻鹽水，確保這根管子內的殘留液體皆是本次實驗的均勻鹽水。之所以要這樣做，是為了使入流歷線的對應時間能更正確，因為管子內如果殘留清水，開始入流時會先入流清水，之後才是入流鹽水。



第四章 實驗結果與分析

本研究分別進行定量異重流(指鹽水入流量不隨時間變化)與變量異重流實驗(指鹽水入流量隨時間變化)，再加以比較，比較的項目有異重流頭部速度、異重流厚度歷線與潛入點移動特性。定量異重流的文獻皆指出頭部速度與異重流身體厚度，在很短距離內皆會達到定值，本研究將以實驗數據探討變量異重流的頭部速度與身體厚度之變化歷程，並與本研究之定量異重流實驗比較，以同一實驗水槽比較變量異重流與定量異重流方能釐清其差異。

4-1 濃度剖面

於定量異重流情況，流量為 $276\text{cm}^3/\text{s}$ ，在 $x=5\text{m}$ 、 7m 、 9m 等三個斷面架設 8 孔(孔徑 3.5mm ，孔與孔之間距 1cm)的虹吸管取樣器，量測得濃度的垂直剖面如圖 4-1 所示。濃度剖面為標準之鹽水異重流濃度剖面，近底床有一等濃度層，漸變層約一公分。

4-2 異重流頭端

4-2-1 定量異重流

在定量入流的狀況下，Britter and Linden (1980)有提出平床頭速的經驗公式，但有坡度且坡度 5° 以下目前文獻並無提出頭速的經驗

規則。本文坡度 0.02 (約 1.15°)，進行兩組實驗，第一組探討相同入流量且不同入流濃度下對頭速的影響，第二組探討相同濃度且不同入流量對頭速的影響。實驗結果繪於圖 4-2 與圖 4-3(圖中線條名稱代表鹽水入流量-入流濃度，例如：線條名稱 276-8.3，表示該實驗之鹽水入流量為 $276 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ ，入流濃度為 $8.3 \frac{\text{g}}{\text{l}}$)，圖 4-2 顯示濃度幾乎不影響頭速發展(嚴謹而言， $x=9\text{m}$ 下游濃度大者頭速稍大些)，圖 4-3 顯示入流量愈大初始頭速愈大， $x=9\text{m}$ 下游則入流量的影響消失(嚴謹而言， $x=9\text{m}$ 下游流量大者頭速稍大些)，此時頭速主要由渠槽坡度控制。所以在本研究的實驗條件下，頭速最終由渠槽坡度控制，可能亦受濃度與流量之微小影響。



4-2-2 變量異重流

變量異重流初期實驗是以目視法獲得異重流頭端移動速度之數據，後期改採 DV 攝影，除了部份目視數據有疑問捨棄外，較無疑問的數據仍納入本文中分析。

① 目視量測：

實驗分三種流況(如圖 4-4 所示)，分別為定量流、突變量流及漸變量流。其中定量流做為對照用，任何時間下流量皆保持固定；突變量流則是在一段時間後具有一個階梯狀的流量變化，持續 60 秒後又

恢復為定量流；而漸變量流則是在一段時間後具有數個階梯狀的流量變化，持續 60 秒後又恢復為定量流。這三個實驗除了流況不同外，其餘實驗條件皆相同(進水口 10cm 處水深為 9.3cm、入流鹽水濃度 6.39g/l)，實驗人員以目視異重流頭端到達各斷面的觀測點時即按下碼錶，記錄下觀測點距離進水口的距離與時間(資料如表 4-1 所示)，最後以相鄰二觀測點的距離除以時間差來表示異重流頭端移動速度，其累積結果及分段結果分別繪如圖 4-5、4-6 所示。

因為這三個實驗是以人員目視的方式記錄，所以在起始時間的讀數上可能有誤差產生，此處不採用原始數據的起始時間，改以 $x=2m$ 當作圖 4-5、4-6 的起點(表 4-1 顯示突變量流在 $x=2m$ 處到達時間較其他兩組慢約 5 秒，可能是起始時間不一致造成)。

註：本文之後提及的變量流況多屬漸變量流，為避免瑣碎敘述，在此先定義一些代表符號，如圖 4-7 所示， T_u 代表入流量開始變化的那一刻， T_b 代表入流量變化的累積時間。例如圖 4-4(c)的漸變量流，其 $T_u=90s$ 、 $T_b=60s$ 。其他如符號 x 將代表實驗渠道中距離進水口的位置，符號 T 代表鹽水入流後之時間間隔。例如斷面 $x=2m$ ，表示該斷面距離進水口之距離有 2m；又 $T=90s$ ，表示鹽水入流後經過了 90s。另外文中有寫實驗編號者代表存在有影片檔。

②攝影量測

以目視量測不易事後檢查，故以 DV 攝影記錄異重流頭端移動，實驗編號 SH-1、SH-2、SH-3 分別為定量流、突變量流及漸變量流，與之前目視量測的實驗條件相同。實驗編號 SH-4 為漸變量流，入流

鹽水的重量濃度為 6.13g/l ， $x=10\text{cm}$ 處水深為 9.3cm ，其 $T_u=180\text{s}$ 、 $T_b=60\text{s}$ 。圖 4-8 為實驗之入流量歷線，圖 4-9、4-10 分別為頭端移動到各斷面的時間關係與異重流頭端到達各斷面的頭速關係圖，記錄資料如表 4-2 所示。

4-2-3 頭端移動特性

- ①對於定量流的頭端速度而言，在圖 4-2、圖 4-3、圖 4-6、圖 4-10 顯示出，於規則渠道下(斷面形狀相同，坡度固定)，頭端速度會趨近於一定值。這個頭速定值的大小可能與坡度關係最大，因為不同入流量或不同入流濃度或流經彎道，對頭速定值的改變皆不大(頭速定值趨近 0.05m/s)。若比較不同入流量或不同入流濃度對頭速的影響，則以入流量影響較顯著，入流量的大小是影響頭速定值發生時刻的關鍵。
- ②比較圖 4-5、圖 4-6 及圖 4-9、圖 4-10，頭端到達時間與距離關係圖只能反映出頭速開始改變的時間與位置，卻無法看到頭速的變量過程，圖 4-6 與圖 4-10 可看出各分段頭速的變化過程，但同時數據的跳動也比較劇烈，所以可視需要畫圖。
- ③由圖 4-6 與圖 4-10 比較定量流、突變量流與漸變量流可看出，在 $x=5\text{m}$ 之前 $T<90\text{s}$ ，三者的入流量皆相同故頭速幾乎一致。

當 $x > 5\text{m}$ 時，突變量流況與漸變量流況在進口處入流量有變動，故其後的頭速線有明顯區分開，突變量流最大頭速達 0.104m/s ，遠大於漸變量流的 0.083m/s ，可見增加入流量對加速頭部移動有直接的效果。

④ 檢視 $T_u=90\text{s}$ 的漸變量流況，由表 4-2 知頭速在 $x=5\text{m}$ 處就已受入流量增加的影響，頭速明顯增加，顯然頭速反應入流量變化的時間極短，所需時間遠小於水分子自進水口流至 $x=4.9\text{m}$ 所需時間(約 90s 左右)，所以頭速感受到入流量增加不是水分子質量傳遞。

若比較 $T_u=90\text{s}$ 與 $T_u=180\text{s}$ 的漸變量流頭速變化(表 4-2)，則可知 $T_u=90\text{s}$ 漸變量流的頭速變化期間自 $x=4.7\text{m}\sim 8.4\text{m}$ (由頭速增大判斷其應是入流量變化期間)，期距為 56.5 秒；而 $T_u=180\text{s}$ 漸變量流的頭速變化期間自 $x=9.5\text{m}\sim 13.2\text{m}$ ，期距為 57.3 秒，兩個期距皆等於入流歷線的 T_u 值(60s)。皆顯示當入流量降低為小流量時，頭速隨之回復為小流量的頭速。因為本文中記錄的是事件發生後之頭速，亦即必須先發生頭速增加事件且流過一段距離後才記錄得到，故本文無法確定頭速開始增加的那一個時間點，僅推測鹽水異重流的頭速變化比較接近是一種壓力波傳遞，如同地下水拘限含水層，當頭水有補注水量進入時，尾水立即流出，流出的尾水是之前已到達尾水處的水分子，不是頭水新補注的水分子。

4-3 異重流身體

河川變量流進入水庫產生變量異重流，有兩種情況，一是變量發生之臨前條件為整個水庫內已存在異重流流動通路，本文稱之為有基流情況，另一種情況變量發生之臨前條件乃水庫內沒有異重流，或者是異重流未形成整個通路(從上游至下游)，這種情況本文稱之為無基流情況。

4-3-1 有基流情況

異重流身體在變量流況下會產生一個類似洪水波的擾動往下游傳遞，實驗的入流歷線為漸變量流況，入流鹽水的重量濃度 6.39g/l， $x=10\text{cm}$ 處水深為 9.3cm，其 $T_u=750\text{s}$ 、 $T_b=60\text{s}$ ；於斷面 $x=7\text{m}$ 、 $x=21\text{m}$ 、 $x=34\text{m}$ 側各架設有 DV 觀察，其編號分別為 SB-1、SB-2、SB-3。圖 4-11 是 $x=7\text{m}$ 、 $x=21\text{m}$ 、 $x=34\text{m}$ 的定點歷時厚度變化，該圖中橫軸為時間，左邊的縱軸為異重流厚度，右邊的縱軸為入流量。入流量歷線是以虛線表示，對應橫座標與右縱座標；異重流厚度歷線是以粗線加圈圈表示，對應橫座標與左縱座標；異重流厚度歷線的記錄資料如表 4-3 所示。

4-3-2 無基流情況

在無基流情況，進行二組實驗，一組是定量流況(鹽水入流量固

定 $276\text{cm}^3/\text{s}$)；另一組則是漸變量流，其 $T_u=90\text{s}$ 、 $T_b=60\text{s}$ 。這二組實驗的入流鹽水重量濃度為 6.39g/l ， $x=10\text{cm}$ 處水深為 9.3cm ，僅入流量歷線不同，且均於斷面 $x=5\text{m}$ 、 $x=7\text{m}$ 、 $x=28\text{m}$ 處觀測，故可用以對照。定量異重流與漸變量異重流的厚度歷線，分別如圖 4-12、圖 4-13 所示，記錄資料如表 4-4 所示。

4-3-3 異重流厚度變化

- ①由圖 4-11、圖 4-12、圖 4-13 可知，一開始厚度為 0，經一段時間後異重流頭端到達，記錄上始有厚度產生。圖中最初的厚度起伏即異重流之頭端，這三張圖的頭端差異頗大，這是因為異重流頭端形成的大渦流沖散染料色度，色度觀察上會大受影響，故這三張圖頭端附近的厚度歷線較不一致。僅可知異重流行進越久，頭端的厚度會略高但頭端範圍卻越窄(因為頭端渦流呈橢圓形，故平行流向之方向受到的影響最大，沖散頭端尾部平行流向的染料色度所致)。
- ②異重流頭端後之身體染料色度漸明顯與混合層區分開，所以圖 4-11、圖 4-12、圖 4-13 中所記錄的身體厚度是幾乎一致的(約 5.5cm)。於圖 4-11、圖 4-13 中除了記錄到最初頭端的厚度起伏外，還於其後的時刻看到另一個厚度起伏，這個厚度起伏是因為入流量的變化產生，本文稱變量波。由圖中可判斷出變量波的速度較頭端

快(因為越往後的斷面可看到頭端與變量波之時距越小)。

- ③由圖 4-13 可看到斷面 $x=5\text{m}$ 及 $x=7\text{m}$ 的歷線上都有變量波存在，但 $x=28\text{m}$ 歷線上變量波消失，圖形上僅剩頭部有一次厚度起伏，可見變量波傳遞速度快於頭端速度，且變量波追到異重流頭端後將受阻於頭部，增加的水量將累積於頭部上游，無法發生洪水波傳遞現象。

4-4 潛入點

異重流之潛入點在定量入流情況下就不是自始不動的，而是遵循著先快速移動、再緩慢移動、最後固定不動的模式，圖 4-14 是定量異重流潛入點移動的範例(流量固定為 $507\text{cm}^3/\text{sec}$)。

4-4-1 變量流潛入點實驗

潛入點在變量流況下也是一直在變化的，本文設計三組漸變量流潛入點移動實驗，如圖 4-15 所示，該圖橫軸為時間，左邊的縱軸為潛入點位置，右邊的縱軸為入流量。入流量歷線是以粗線表示，對應橫座標與右縱座標；潛入點歷線是以線條加圈圈表示，對應橫座標與左縱座標。其中圖 4-15(a)的入流情況為 $T_u=0\text{s}$ 、 $T_b=60\text{s}$ ，入流鹽水重量濃度為 6.39g/l ， $x=10\text{cm}$ 處水深為 9.3cm ；圖 4-15(b)為 $T_u=90\text{s}$ 、 $T_b=60\text{s}$ ，入流鹽水重量濃度為 6.39g/l ， $x=10\text{cm}$ 處水深為 9.3cm ；而圖 4-15(c)則是 $T_u=180\text{s}$ 、 $T_b=60\text{s}$ ，入流鹽水重量濃度為 6.13g/l ， $x=10\text{cm}$

處水深為 9.3cm，編號 TSI-1。潛入點歷線的記錄資料如表 4-5 所示。

4-4-2 潛入點變化

①圖 4-15(a)、(b)、(c)分別是在 0 秒、90 秒、180 秒發生變量入流情況，圖中顯示潛入點歷線是不對稱的。在入流量變量期間潛入點幾乎一直往前移(往下游方向)，而且移動速度快；當入流量變為定量時，潛入點會往回走(往上游方向)，初期快速後退，然後緩緩退回，最後退到約距進水口 0.1m 處的位置。

②在本實驗水槽施放定量流 $276 \text{ cm}^3/\text{s}$ 不會發生潛入現象，所以圖 4-15(b)、(c)最初無潛入點，直至施放變量流才開始有潛入，變量流結束後，雖然流量回復至 $276 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，潛入現象卻未消失，推測一旦潛入點形成就在潛入點附近產生一定慣性流場且具有不可逆性質，所以潛入的形成條件，不僅僅是受入流條件影響而已。

4-5 數值模擬

本節將以 Hsu and Yu (1996)所建構的數值模式來模擬，其數值模式是以 MacCormack 顯示法求解水流連續方程式、泥砂連續方程式及動量連續方程式，計算上須先給予已知之上游邊界條件，且為有基流狀態下之變量異重流模擬，故可與本文之有基流實驗來比較。

4-5-1 模式輸入條件

模式中除有些零星的輸入條件須修改為本文實驗所相符，如渠道總長 42m、渠寬 0.1m、坡度 0.02(1.15°)、鹽之比重 $s=2.165$ ，並計算至 $T=1500s$ ，觀察 $x=7m$ 、 $x=21m$ 、 $x=34m$ 之厚度歷線等，捲水係數參考徐小微(2002)的模擬結果，對本渠槽鹽水異重流實驗而言捲水係數較符合 0.0005，其他參數大致不動。

起始條件方面，須輸入平均濃度 $\bar{C} = 6.39 / 2.165 / 1000 = 0.00295$ ，異重流基流厚度由表 4-3 得知 $h = 0.055 m$ ，而 Richardson Number 可以下式計算：

$$R_i = \Delta_s g \cos \theta \frac{\bar{C} h}{\bar{u}^2} \quad (1)$$

式中 Δ_s 為比重差異，即 $\Delta_s = 2.165 - 1 = 1.165$ ；

g 為重力值，代 $g = 9.81 m/s^2$ ；

θ 為渠道坡度，故 $\cos \theta = \cos(1.15) = 0.9998$ ；

$\bar{C} = 0.00295$ ，異重流體積濃度；

$h = 0.055 m$ ，異重流基流厚度；

$\bar{u}$ 為異重流基流平均流速，即 $\bar{u} = 276 / 10.2 / 5.5 / 100 = 0.0492 m/s$ ；

故 $R_i = 0.766$ 。

入流歷線方面，須輸入入流量開始變量時間 $T_u=750s$ ，變量累積時間 $T_b=60s$ ，基流量 $q_0=0.0027\text{cms/m}$ 及巔峰流量 $q'_p=0.00895\text{cms/m}$ 。

如此模式之入流歷線公式如下：

$$\begin{aligned} q(t) &= q_0 & 0s \leq t \leq 750s \\ q(t) &= q_0 \left\{ 1 + 1.16 \left[1 + \sin \left(\pi \left(\frac{2(t-T_u)}{T_b} - \frac{1}{2} \right) \right) \right] \right\} & 750s < t < 810s \\ q(t) &= q_0 & t > 810s \end{aligned} \quad (2)$$

實驗的入流歷線與模擬的入流歷線比較圖如圖 4-16 所示，二者形狀是相似的。

4-5-2 模擬結果

①厚度上的差異

模擬出之異重流厚度歷線、濃度歷線與流速歷線分別如圖 4-17、4-18、4-19 所示。因為數值模擬是先求得基流的穩態解，再用以求解變量流，故數值模擬的歷線上是沒法說明頭端的現象。由圖 4-17 可知，數值模擬的異重流厚度是 $x=34 > x=21\text{m} > x=7\text{m}$ ，且厚度之差距明顯，但實驗記錄上異重流厚度雖也是 $x=34 > x=21\text{m} > x=7\text{m}$ ，差異確不是如此大的，這現象必須從圖 4-18 說明。

由圖 4-18 可看出，數值模擬的異重流濃度是 $x=34 < x=21\text{m} < x=7\text{m}$ ，最初入流濃度為 0.00295，至 $x=7\text{m}$ 降為 0.00275 左右，至 21m 降為 0.00245 左右，至 $x=34\text{m}$ 降為 0.0022 左右。這顯示數值模擬的

異重流厚度，如 $x=7\text{m}$ 是相對於濃度 0.0021 並非 0.00295，其包含部份混合層厚度所以模擬厚度較實驗記錄值為大(相對於濃度 0.00295 左右)，故這是可能發生的現象。

②變量波到達時間差異

若比較圖 4-17 實驗記錄與數值模擬的變量波到達時間，數值模擬之變量波波峰至 $x=7\text{m}$ 、 $x=21\text{m}$ 、 $x=34\text{m}$ 的時間分別為 $T=832\text{s}$ 、 $T=960\text{s}$ 、 $T=1090\text{s}$ ；而實驗記錄之變量波波峰至 $x=7\text{m}$ 、 $x=21\text{m}$ 、 $x=34\text{m}$ 的時間分別為 $T=900\text{s}$ 、 $T=1047\text{s}$ 、 $T=1179\text{s}$ 。實驗記錄的變量波到達時間較數值模擬結果約慢 75s 左右，這時間差異接近變量累積時間 $T_b=60\text{s}$ ，或許與此有關。再由圖 4-17、4-18、4-19 來看模擬歷線的厚度、濃度與速度關係，可知厚度與速度的變量波波峰到達 $x=7\text{m}$ 、 $x=21\text{m}$ 、 $x=34\text{m}$ 的時間是一致的，但濃度變量波波峰到達時間確較晚。這表示變量入流量的增量會推擠之前就已存於渠道中的基流(渠道中的基流濃度較入流濃度低，因為受捲水影響)使產生厚度起伏。所以會得到濃度峰較晚到達，故一維模擬所得之厚度峰其實比較接近於異重流本體加上混合層積分後的那部份，也就是說模擬出的厚度歷線該稱混合層的厚度歷線較適當，故模擬所得的厚度峰會快過實驗記錄 60s 到達，即會先看到混合層厚度峰經過再看到異重流本體的厚度峰經過，之間相差一個 T_b 以上的時間是可能發生的現象。

③變量波移動速度差異

前述變量波到達時間，實驗值與數值模擬上有蠻一致的時間差存在，可推得變量波移動速度的差異也會有蠻一致的結果，分別計算實驗值與數值模擬的移動速度如下：

$$\begin{cases} V_{21m}^{\text{實驗}} = \frac{(21-7)}{(1047-900)} = 0.0952\text{m/s} \\ V_{34m}^{\text{實驗}} = \frac{(34-21)}{(1179-1047)} = 0.0985\text{m/s} \\ V_{21m}^{\text{模擬}} = \frac{(21-7)}{(960-832)} = 0.1094\text{m/s} \\ V_{34m}^{\text{模擬}} = \frac{(34-21)}{(1090-960)} = 0.1\text{m/s} \end{cases}$$

在距離進水口 21m 處，移動速度差異有 $\frac{0.1094-0.0952}{0.0952} * 100 = 15\%$ ；在距離進水口 34m 處，移動速度差異有 $\frac{0.1-0.0985}{0.0985} * 100 = 1.5\%$ ，顯示距離進水口越遠，模擬出之移動速度越接近實際狀況。

④變量波波形變化

圖 4-17 若將歷線中的厚度減去基流厚度(即相對基流厚度)，時間減去變量波波峰到達時間(即相對波峰時間)，則可比較圖中 $x=7\text{m}$ 、 $x=21\text{m}$ 、 $x=34\text{m}$ 三處的變量波波形，實驗記錄與數值模擬的變量波波形圖分別如圖 4-20、4-21 所示。

圖 4-20 實驗記錄的變量波波形，其波峰相對基流厚度約 2cm，受影響的相對波峰時間約-100s~150s(有 250s 即 4 倍左右的 T_b)，波形不太對稱(右半邊略底但影響時間較長)，厚度上 $x=34 > x=21\text{m} > x=7\text{m}$

的情形不明顯，僅增加少許。相對於圖 4-21 數值模擬的變量波波形，其波峰相對基流厚度約 3.5cm(較高於實驗記錄)，受影響的相對波峰時間 $x=34 > x=21m > x=7m$ ，可由 -50s~200 左右(範圍跟實驗記錄差不多)，波形也呈不對稱，右半邊影響時間較長(趨勢同實驗記錄)。

由模擬結果與實驗值比較後，認為 Hsu and Yu (1996)所建構的數值模式應能捕捉到基流下變量波的趨勢，但程度上可能高估了實際會發生的變量波波高。

4-6 密差福祿數分析

以往文獻中關於異重流現象之分析，常使用密差福祿數，此一無因次參數代表慣性力與重力的比較，對於異重流現象而言是有意義的，因為本實驗的異重流現象從入口處開始是一種慣性力作用轉換成重力作用的過程。密差福祿數的公式如下：

$$F_p = \left(\frac{q_p^2}{g'_p H_p^3} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中 q_p 為單位寬度流量；

$g'_p = (s-1)g\bar{C}_p$ 為密差重力值；

s 為沉滓比重；

$\bar{C}_p$ 為沉滓平均濃度；

H_p 為潛入水深。

將實驗設定的入流量除以渠道寬度 10cm，並換成(m^2/s)的單位可得 q_p ，重力值代 $9.81(\text{m}/\text{s}^2)$ ， s 代 2.165(-)， $\bar{C}$ 代 0.00295(-)，而潛入水深 H_p 則可利用表 4-5 中潛入點的位置乘與表 3-1 的坡度而得，並換成(m)的單位。如此便可將上述已知代入(3)式求得密差福祿數歷線，以 $T_u=90$ 的潛入點實驗為例，其潛入點歷線與密差福祿數歷線的比較圖繪如圖 4-22 所示。

圖 4-22 中， $T=0\sim 90\text{s}$ 無潛入點(F_p 約 0.66)，鹽水異重流是直接在水下運行，這可與俞維昇(1991)的潛入點觀點相呼應，因為在本文中發現如果鹽水異重流直接在水下運行時，其 F_p 約 0.66。若是一開始有潛入現象，則 F_p 會從大於 1.0 一直降至約 0.6 左右，潛入點才不會移動，因為清水下鹽水異重流移動應是要滿足 $F_p=0.6$ 左右。

當 $T=90\sim 150\text{s}$ 產生一個漸變量入流情況，其間的 F_p 變化是先升後降， F_p 最高升至 1.38 對應之 $T=115\text{s}$ 即流量最大的時刻，隨後 F_p 下降(因入流量減小)，但潛入點卻仍往下游移，因為這時 F_p 仍大於 1.0，表示慣性力猶大於重力。等到 F_p 降至約 1.0 時可發現其對應的潛入點位置也是最遠的，當 $F_p < 1.0$ 時(慣性力 < 重力)，潛入點緩緩退回上游，這結果表現出潛入點的移動與 F_p 非常有關，對於一個變量流所造成的潛入點現象可簡單推算 $F_p > 1.0$ (潛入點往下游移)； $F_p < 1.0$ (潛入點往上游移)； $F_p=1.0$ (潛入點可移動的最遠處)。

圖 4-22 中， F_p 的下降是有底限的， F_p 降至 0.4 時對應 $T=160s$ (在 $T=150s$ 時入流量已降回基流量)，之後 F_p 又開始上升，這次的 F_p 上升跟之前 $T=90\sim150s$ 的 F_p 上升情況不同，因為之前 $T=90\sim150s$ 的 F_p 上升是入流量增加所造成，但 $T>160s$ 後的 F_p 上升則不是入流量所致(因為入流量已固定為基流量)。思索 F_p 的公式，若慣性力不變(q_p 為定值)則 F_p 上升的條件為重力遞減，且主要是因厚度 H_p 的遞減效應，而這個遞減也是有底限的，重力遞減一直遞減到 F_p 約 0.53 左右才停止。這結果再次表示清水下鹽水異重流移動應是要滿足 $F_p=0.6$ 左右。由本文的實驗值定義清水下鹽水異重流移動應該要滿足 $0.53 < F_p < 0.66$ 的潛入條件，故本文中潛入點的移動才會呈現不可逆性， F_p 由高至低與 F_p 由低至高所須的潛入水深是不同的。

4-7 波速分析

若將明渠水流的洪水波波速公式之重力值改以密差重力值，則可得密差波速如下，這個密差波速是相對於基流速度：

$$c_p = \sqrt{g'_p h} \quad (4)$$

式中 g'_p 為密差重力值；

h 為異重流基流厚度。

利用 4-3-1 節有基流實驗的資料來做比較，在 $x=21m$ 的基流厚度代

0.055m， $\bar{C}$ 代 0.0028(由圖 4-1 可推測最初入流體積濃度為 0.00295，入流後因捲水作用會使濃度略微降低，所以此處的濃度值是假設為 0.0028)， $g = 9.81\text{m/s}^2$ ， $s = 2.165$ ，計算得 $c_p^{21} = 0.042\text{m/s}$ ， $x=21\text{m}$ 的基流速度為 $276/10.2/5.5/100 = 0.049\text{m/s}$ ，故理論上 $x=21\text{m}$ 處看到的變量波移動速度為 $V_{21\text{m}} = 0.042 + 0.049 = 0.091\text{m/s}$ 。而 $x=34\text{m}$ 的基流厚度代 0.06m， $\bar{C}$ 代 0.0028， $g = 9.81\text{m/s}^2$ ， $s = 2.165$ ，計算得 $c_p^{34} = 0.044\text{m/s}$ ， $x=7\text{m}$ 的基流速度為 $276/10.2/6/100 = 0.045\text{m/s}$ ，故理論上 $x=34\text{m}$ 的變量波移動速度為 $V_{34\text{m}} = 0.044 + 0.045 = 0.089\text{m/s}$ ，由理論公式推算的結果 $V_{21\text{m}} (= 0.091\text{m/s}) > V_{34\text{m}} (= 0.089\text{m/s})$ 。

實驗測得的變量波波峰到達時間於 $x=7\text{m}$ 、 $x=21\text{m}$ 、 $x=34\text{m}$ 分別為 $T=900\text{s}$ 、 $T=1047\text{s}$ 、 $T=1179\text{s}$ ，計算得 $V_{21\text{m}}^{\text{實驗}} = \frac{(21-7)}{(1047-900)} = 0.0952\text{m/s}$ ， $V_{34\text{m}}^{\text{實驗}} = \frac{(34-21)}{(1179-1047)} = 0.0985\text{m/s}$ ，結果 $V_{21\text{m}}^{\text{實驗}} < V_{34\text{m}}^{\text{實驗}}$ 與先前理論公式推算的結果相異，探究其因可能是基流速度推算上出了問題，因為異重流行進中會產生的捲水作用有助基流速度之增加，此處應換個角度來估算基流速度。

回顧 4-2-3 節的頭端移動特性可知，頭端速度在基流下應趨近於一定值，由本文中表 4-2 的資料來看，頭端速度在基流下的定值可假設為 0.055m/s ，並假設異重流在基流下，身體內部基流速度與此值相當，即 $x=21\text{m}$ 、 $x=34\text{m}$ 的基流速度皆是 0.055m/s ，如此理論上變量波

$$\text{移動速度應} \begin{cases} V_{21m} = 0.042 + 0.055 = 0.097\text{m/s} \circ \\ V_{34m} = 0.044 + 0.055 = 0.099\text{m/s} \circ \end{cases}$$

因此理論上 $V_{21m}(=0.097\text{m/s}) < V_{34m}(=0.099\text{m/s})$ ，與實驗值趨勢相同，數值上也蠻接近的，若再考量坡度影響或以精密儀器量測，則數值上應會更接近。

4-8 總量分析

根據 4-3-1 節有基流實驗的資料，其入流量歷線是漸變量流 $T_u=750\text{s}$ 、 $T_b=60\text{s}$ ，推算入流量變化所產生的異重流體積增量為 $[(507-276)\times 20 + (719-276)\times 20 + (913-276)\times 20]/1000000 = 0.02622\text{m}^3$ ，這些體積增量會形成變量波在異重流身體行進。若將圖 4-20 中 $x=21\text{m}$ 的波形拿來應用，將其簡化成為一個較規則的三角形如圖 4-23，求算此三角形面積換算為 ms 單位，並乘以渠寬 0.102m 及 $V_{21m}^{\text{實驗}} = 0.0952\text{m/s}$ ，可得變量波的量約 0.021m^3 ，差不多是入流增量的 $\frac{4}{5}$ ，少掉的 $\frac{1}{5}$ 入流增量可能是填補變量期間由頭端流出的部份。

本研究認為水庫於降雨期間水質會混濁，主因在於異重流行進中產生混合層所致。由本文實驗結果得到入流量變化期間，鹽水異重流頭端短時間內便使 $\frac{1}{5}$ 入流增量釋放出產生混合層，而 $\frac{4}{5}$ 入流增量則轉換成變量波於異重流身體行進，由密差波速及基流速度可大略推求變

量波行進速度，當變量波行進至異重流頭端，便是水質混濁最嚴重的時刻。

4-9 頭速分析

4-9-1 入流量與頭速定值

將 4-2-1 節的圖 4-3 畫成頭速與時間關係圖(圖 4-24)，其記錄資料如表 4-6 所示。圖 4-24 中約 $T > 50s$ ，三種不同入流量的頭速皆趨於定值，本文以 $Q=276\text{cm}^3/\text{s}$ 為基準，因為其頭速一開始就趨於定值 0.055m/s 。圖 4-24 的另外二個入流量為 $507\text{cm}^3/\text{s}$ 、 $913\text{cm}^3/\text{s}$ ，其與 $Q=276\text{cm}^3/\text{s}$ 的流量比值分別為 1.84、3.31。由數據分析得知，在開始入流時，頭速與流量比值的 0.7 次方成正比，故另外二個入流量的起始頭速可以 0.055m/s 乘與流量比值的 0.7 次方，分別得起始頭速 0.084m/s 、 0.127m/s 。入流後頭速會降下，約 $T=50s$ 左右趨於定值，這個頭速定值約與流量比值的 0.25 次方成正比，故另外二個入流量的可以 0.055m/s 乘與流量比值的 0.25 次方而得，分別得頭速定值 0.064m/s 、 0.074m/s 。

圖 4-24 中，起始頭速降至頭速定值成線性，發生於 $T < 50s$ 期間。故可定義某入流量 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$ 在入流發生後累積時間 t 時的頭速經驗式如下(示意如圖 4-25)：

$$\begin{aligned} V_{\text{head}} &= 0.0011 * (50 * I^{0.7} - I^{0.7} t + I^{0.25} t) & 0s < t \leq 50s \\ V_{\text{head}} &= 0.055 * I^{0.25} & 50s \leq t \end{aligned} \quad (5)$$

式中 V_{head} 為定量異重流頭速，單位 m/s；

$$I = \frac{Q}{276} \text{ 為流量比值，無因次。}$$

4-9-2 入流量與距離

先前 4-9-1 節的式(5)適用條件為矩形渠道坡度 0.02，定量入流之鹽水異重流，累積時間 t 必須由零開始。若是定量入流後又改變流量，這變量所形成的頭速便不是用式(5)，因為其累積時間 t 非由零開始，而是由某一刻 T_s 開始，隨距離之增加，由某一刻 T_s 開始的入流量所形成的頭速也將越小(若用式(5)計算頭速並與圖 4-4 的漸變量流比較可得此結果)，故式(5)須加入修正係數，設 α 為頭速消減率，將其代入式(5)得方程式(6)如下：

$$\begin{aligned} V_{\text{head}} &= 0.0011 * [\alpha 50 * I^{0.7} - \alpha I^{0.7} t_s + I^{0.25} t_s] \quad , \quad 50s < t < T_s + 50s \\ V_{\text{head}} &= 0.055 * I^{0.25} \quad , \quad T_s + 50s \leq t \text{ 或 } I=1 \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\alpha < 1$ 為頭速消減率，無因次；

若以本文圖 4-4 的漸變量流況 $T_s=90s$ 為例，可求得 α 約為 0.66；

$t_s = t - T_s$ 為變量起算時間，單位 sec。

第五章 總結

5-1 結論

- 1.當異重流頭端在渠槽內行進時，入流量的變量流況會瞬間傳遞到異重流頭端速度上，類似壓力波傳遞，且程度會因距入流處的距離而有所改變。
- 2.入流量的變化同時會反應到入口處潛入點的移動現象，與密差福祿數有關，當 $F_p=1.0$ 時代表潛入點可移動的最遠處。另外， F_p 由高至低與 F_p 由低至高所須的潛入水深不同，具不可逆性。
- 3.變量流況依臨前條件可分有基流與無基流二類。無基流條件下，由入流量的變量流況所產生之變量波將受阻於頭端，變量波所挾帶的增量會快速累積於異重流頭端附近；若是有基流條件下，變量流所挾帶的增量將有少部份會用於填補變量入流期間由頭端輸出的量，剩餘的增量則會形成變量波，在異重流身體行進。
- 4.變量波的行進速度較異重流頭端快，應用密度修正後的簡易淺水波波速式(4)，可概估變量波的行進速度。
- 5.比較 Hsu and Yu (1996)的數值模式，有基流情況的異重流厚度歷線，於波形變化的趨勢上大致相同，但到達時間皆約差異一個 $T_b = 60s$ 的時距，變量波厚度大小上數值模擬結果較偏大。

5-2 建議

1.本研究所用的渠槽，溢流孔是設計在渠槽末端，所以當渠槽前端入水口發生變量入流時，整個渠槽內的總水位仍會有變化(總水位不是立即固定的)，特別是入口處的水位。但文中在用 F_p 分析時，是假設總水位固定，所以得到清水下鹽水異重流移動須滿足 $0.53 < F_p < 0.66$ 的結果，用這結果推測潛入點移動會有不可逆的現象。但也有可能是當初入流時改變了總水位之故，建議後者在深入研究潛入點問題時能考量此一問題。潛入點不可逆的原因也有可能是因上層清水的補充較困難所致，這有待後人進一步地詳細分析潛入週遭的局部現象。



參考文獻

1. Ashida, K., and Egashira, S., "Basic Study on Turbidity Current," Pro. Japan Society Civil Engineering, No. 237, pp. 37-50 (1975).
2. Akiyama, J., and Stefan, H.G., "Turbidity Current with Erosion and Deposition," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp.1473-1496 (1985).
3. Buehler, J., and Siegenthaler, Ch., "Self-Preserving Solution for Turbidity Current," Acta Mechanica, Vol. 63, pp. 217-233 (1986).
4. De Cesare, G., and Schleiss, A., and Hermann, F., "Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 1, pp.6-16 (2001).
5. Ellison, T.H., and Turner, J.S., "Turbulent Entrainment in Stratified Flows," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 6, pp, 423-428 (1959).
6. Garcia, M., "Hydraulic Jumps in Sediment-driven Bottom Current," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 10, pp. 1094-1117 (1993).
7. Parker, G., and Fukushima, Y., and Pantin, H.M., "Self-Accelerating Turbidity," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 171, pp. 145-181 (1986).
8. Parker, G., and Garica, M., and Fukushima, Y., and Yu, W., "Experiments on Turbidity Current over an Erodible Bad," Journal of Hydraulic research, Vol. 25, No. 1, pp. 123-147 (1987).
9. Hsu, S.M., and Yu, W.S., "Simulation of unsteady conservative gravity currents in inclined channels," Hydroinformatics, ISBN 90 5410 852 5, pp. 803-809 (1996).
10. Simpson, J.E., Gravity currents in the environment and the laboratory,

Cambridge University Press, U.K. (1997).

11. Yu, W.S., and Lee, H.Y., "Numerical Simulation of Reservoir Turbidity Current," International Journal of Sediment Research, Vol. 8, No. 2, pp. 43-65 (1993).
12. Yu, W.S., and Lee, H.Y., "Experimental Study of Reservoir Turbidity Current," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.123, No. 6, pp. 520-528. (1997).
13. 呂秀貞，「異重流的孔口排沙問題」，泥沙研究，第 1 期，第 12-21 頁 (1984)。
14. 呂秀真，「非恆定異重流孔口排砂的近似計算」，泥沙研究，第 4 期，第 40-47 頁 (1988)。
15. 范家驊、王華丰、黃寅、吳德一、沈受百，「異重流的研究與應用」，水力水電科學研究院研究報告，第 15 集，中國武漢 (1959)。
16. 俞維昇，「水庫沉滓運動特性之研究」，博士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，台北 (1991)。
17. 徐小微，「鹽水異重流之潛入現象與沿程變化分析」，碩士論文，私立逢甲大學水利工程研究所，台中 (2002)。
18. 陳禹志、洪旺輝，「異重流洪峰自然削減特性實驗觀察」，專題研究論文，私立逢甲大學水利工程學系，台中 (2003)。
19. 黃永健、范家驊，「非恆定異重流計算」，水利水電科學研究院科學研究論文集第 26 集，中國武漢，第 111-122 頁 (1987)。

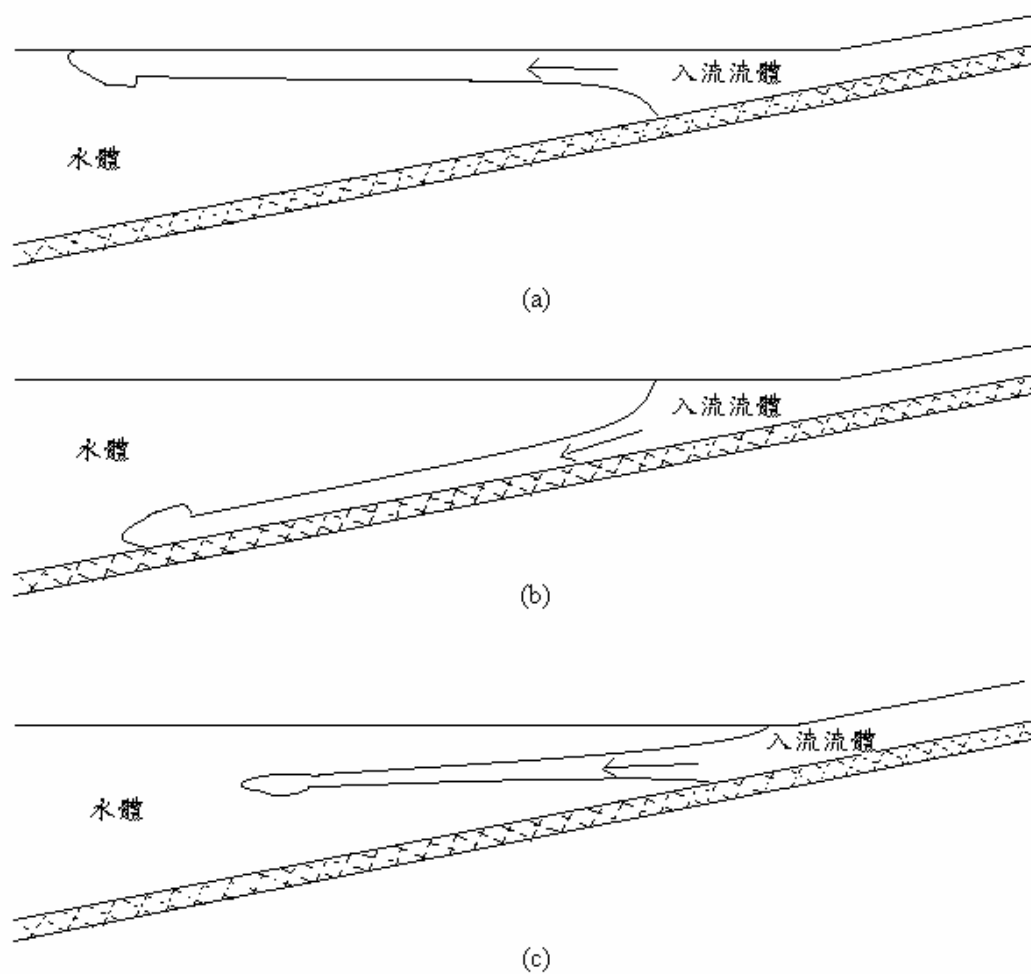


圖 1-1 異重流型態：(a)表層異重流，(b)底層異重流，(c)中層異重流

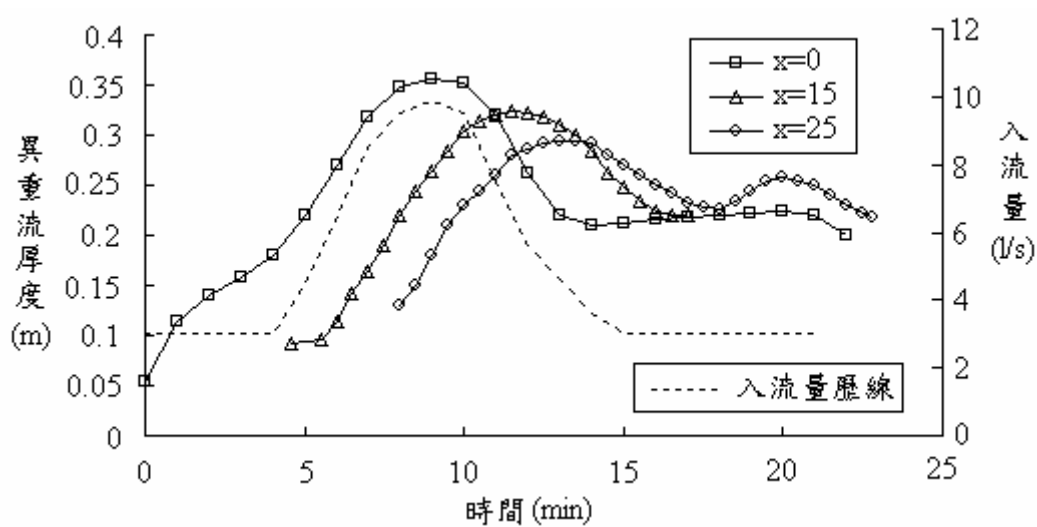


圖 2-1 范(1959)變量異重流水槽試驗量測之異重流厚度歷線

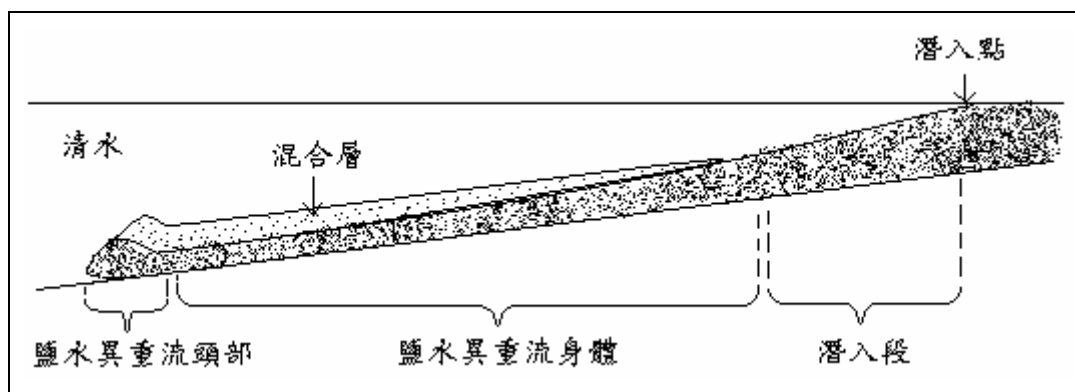


圖 2-2 定量鹽水異重流示意圖

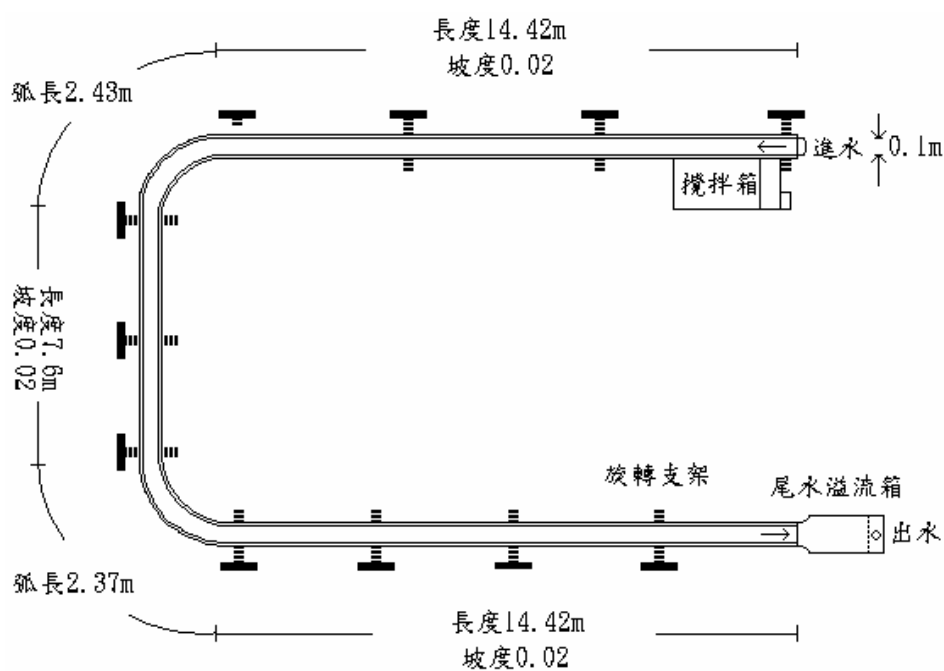


圖 3-1 實驗渠槽俯視圖

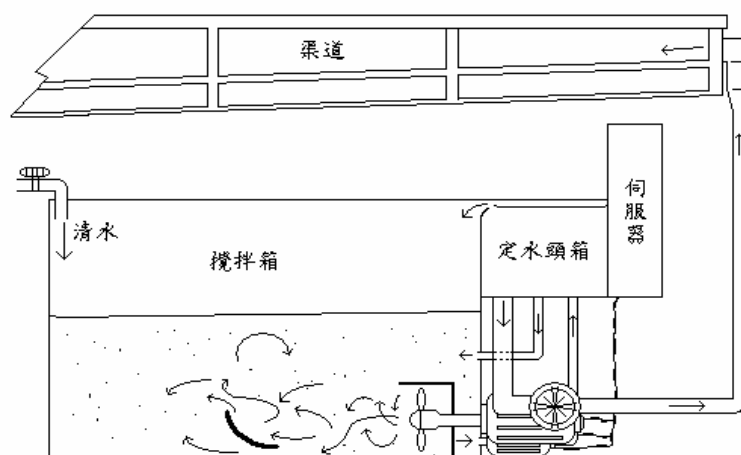


圖 3-2 進水系統示意圖

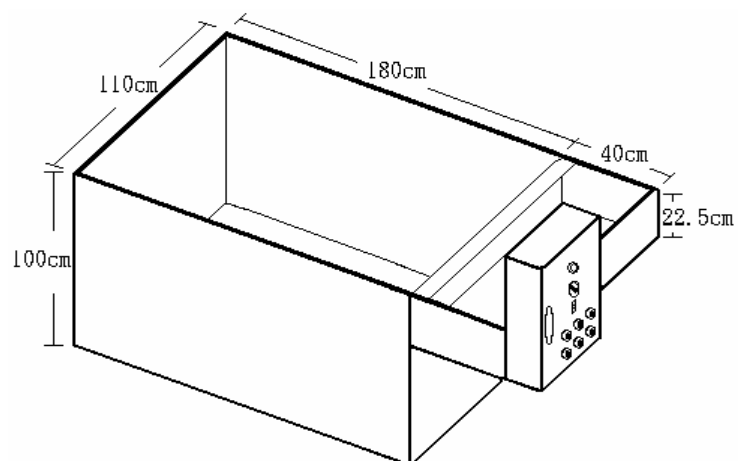


圖 3-3 進水系統立體圖

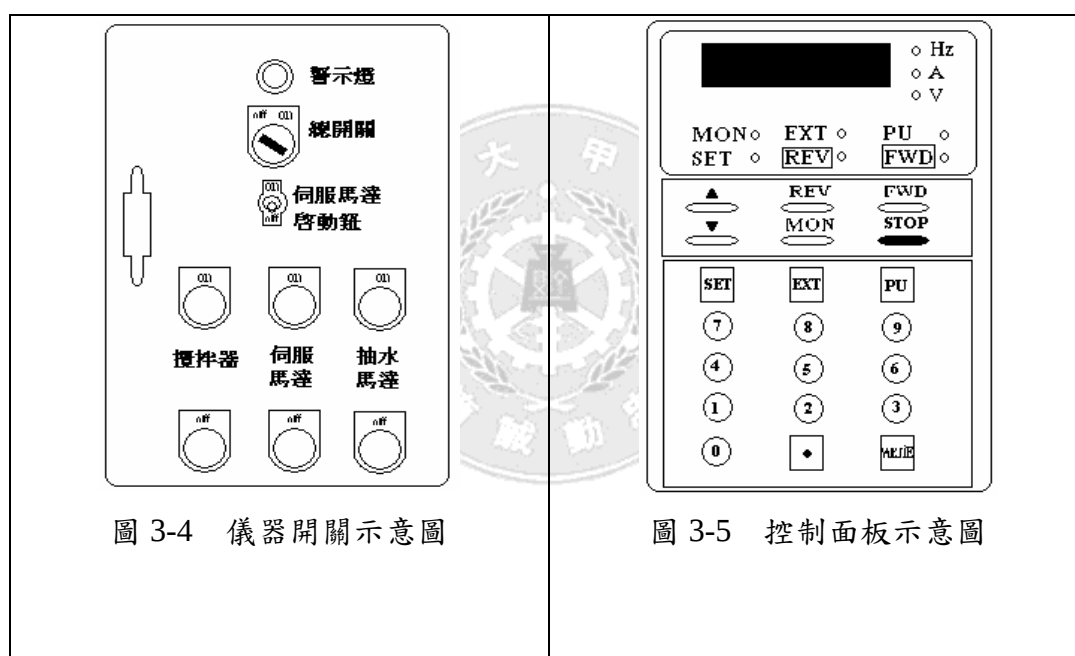


圖 3-4 儀器開關示意圖

圖 3-5 控制面板示意圖

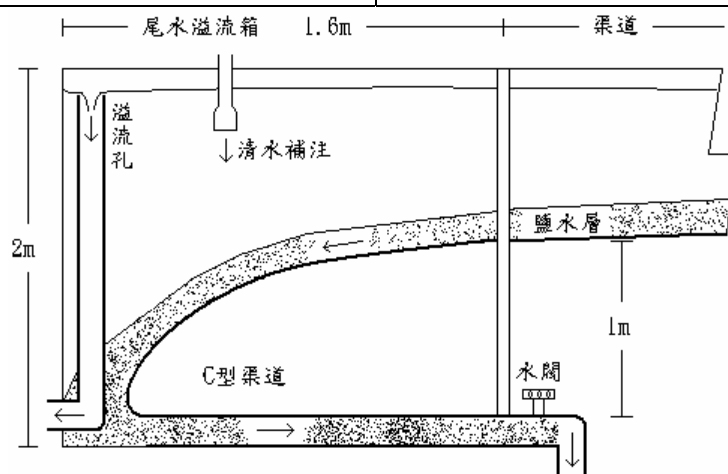


圖 3-6 尾水箱示意圖

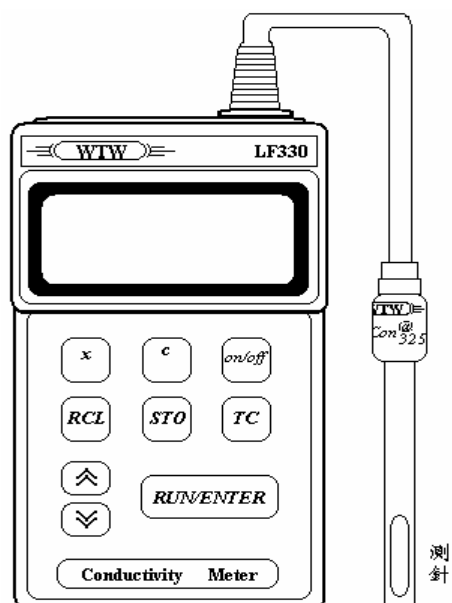


圖 3-7 電導度計示意圖

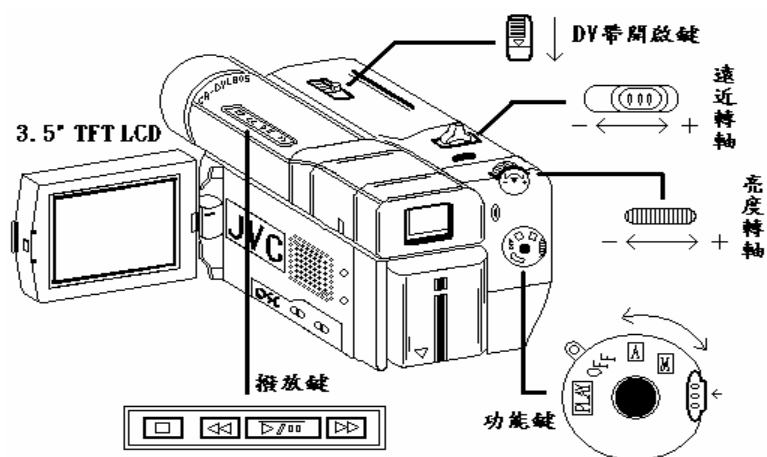


圖 3-8 DV 攝影機示意圖

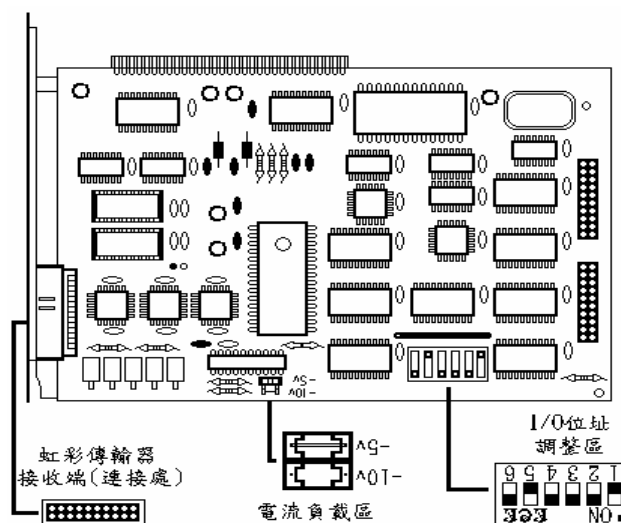


圖 3-9 PCL-711B 介面卡示意圖

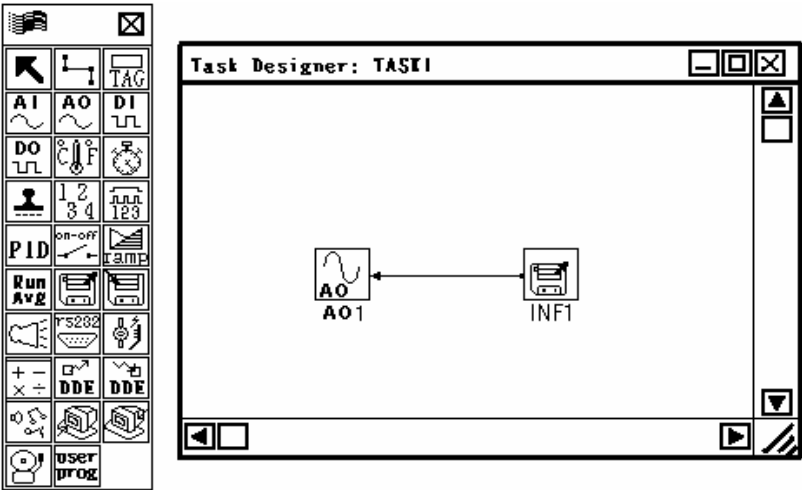


圖 3-10 Advantech VisiDAQ 視窗示意圖

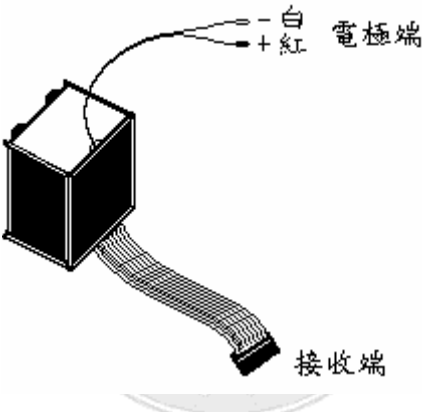


圖 3-11 虹彩傳輸器示意圖

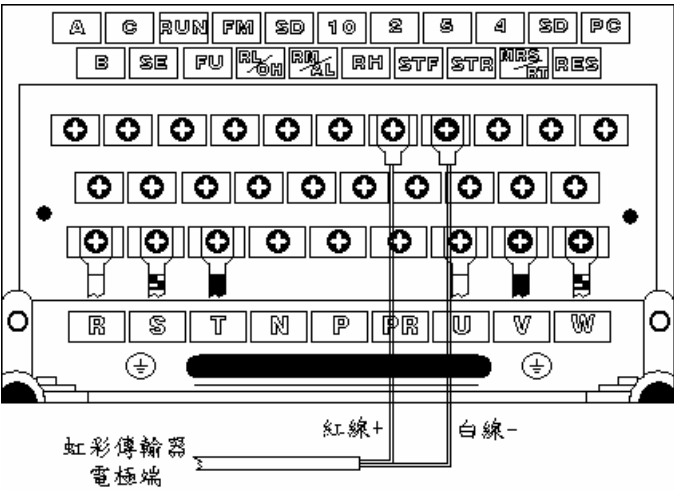


圖 3-12 電極端的線路配置

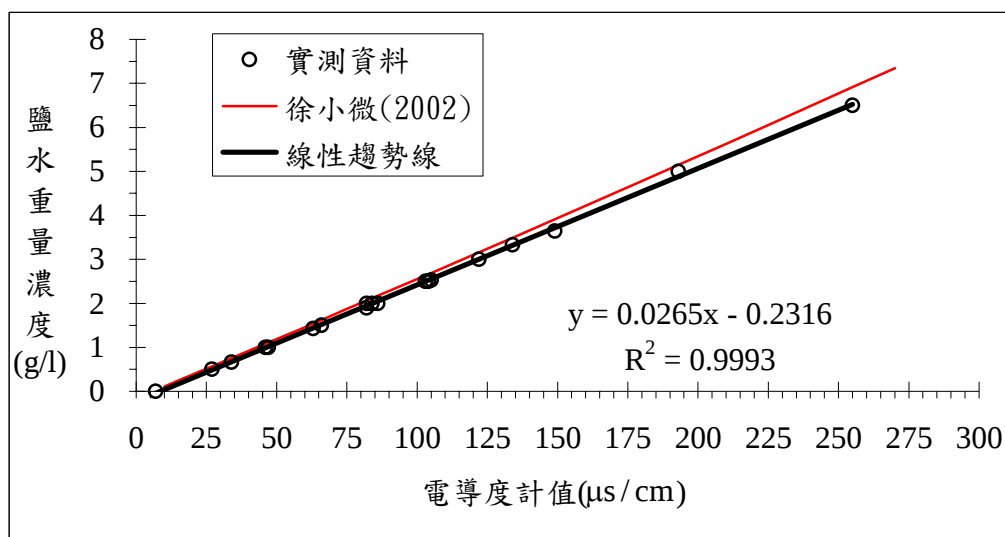


圖 3-13 電導度與鹽水濃度關係圖

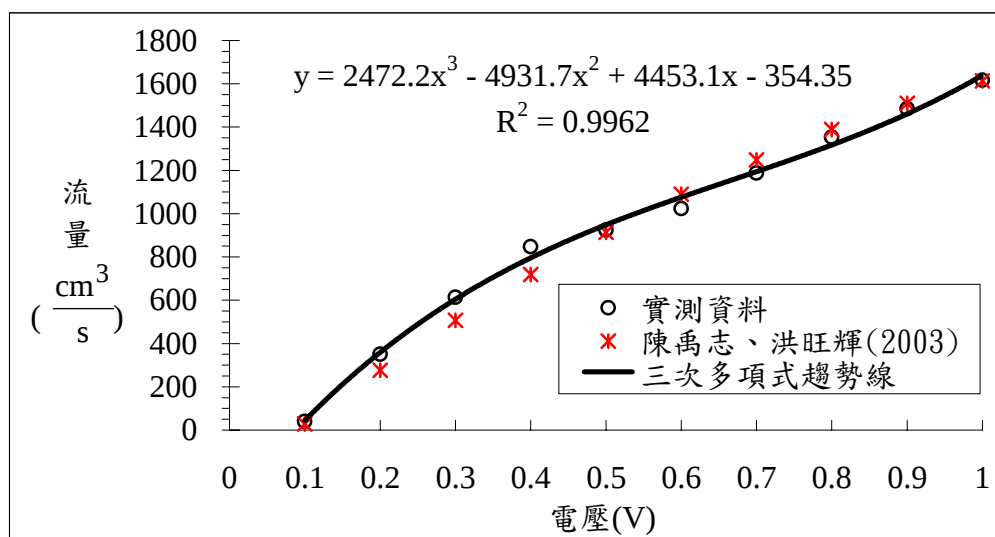


圖 3-14 電壓與流量關係圖

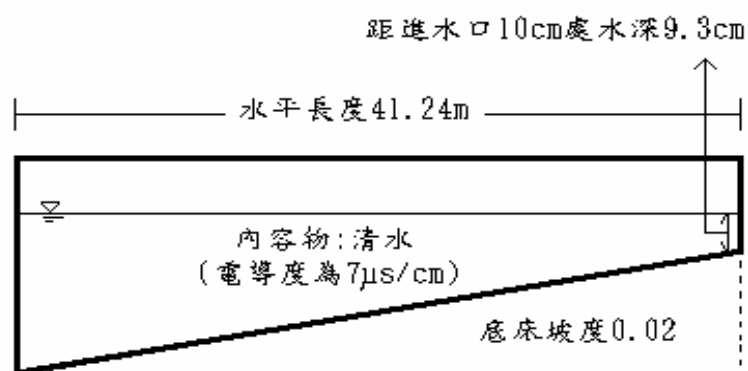


圖 3-15 起始條件示意圖

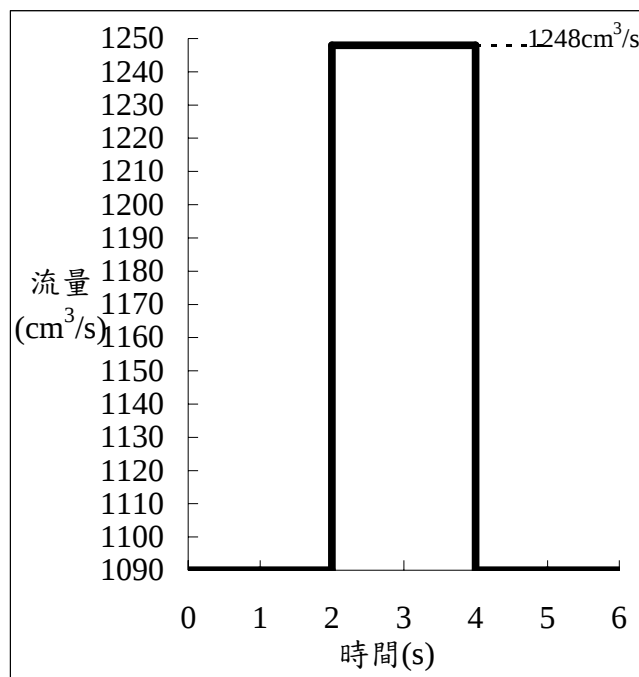


圖 3-16 範例流況

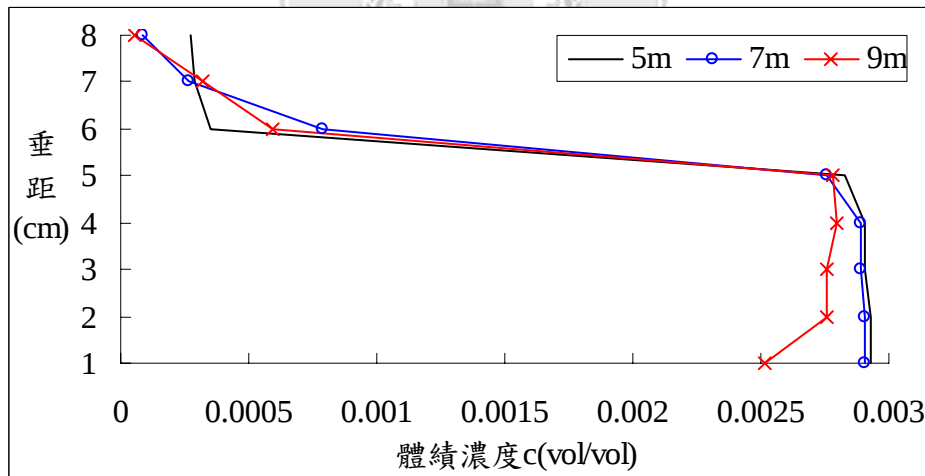


圖 4-1 定量異重流之濃度垂直剖面

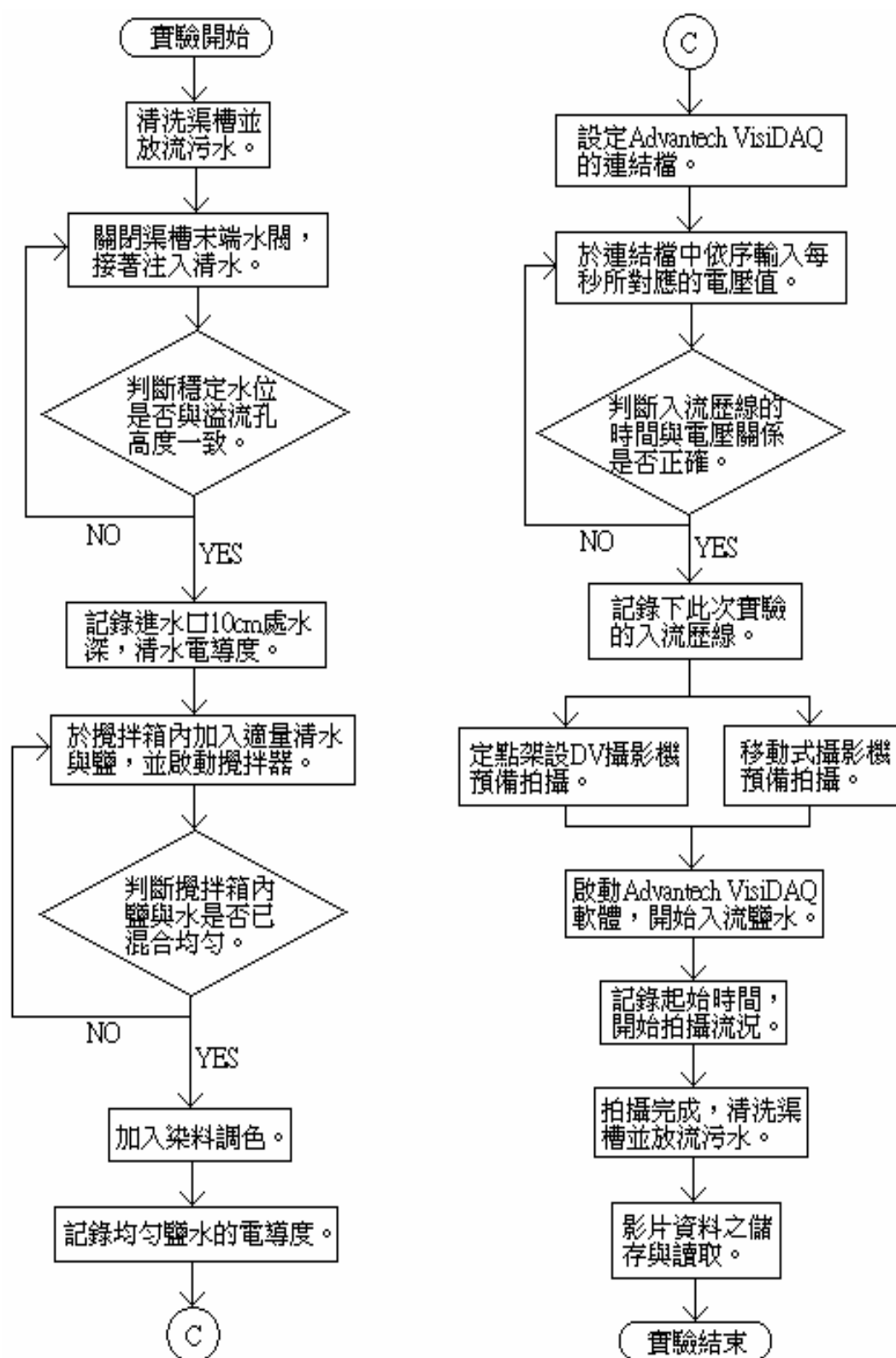


圖 3-17 實驗流程圖

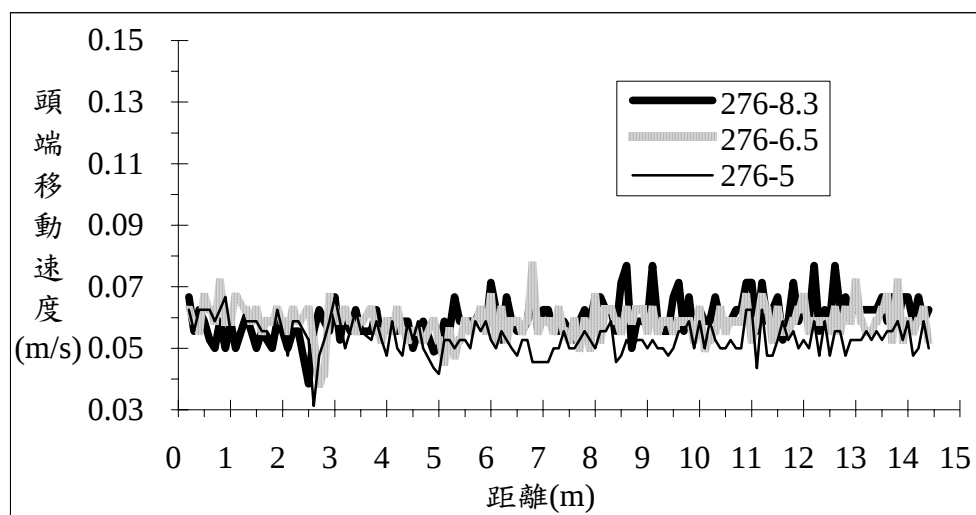


圖 4-2 不同濃度對頭速變化的影響(定量流)

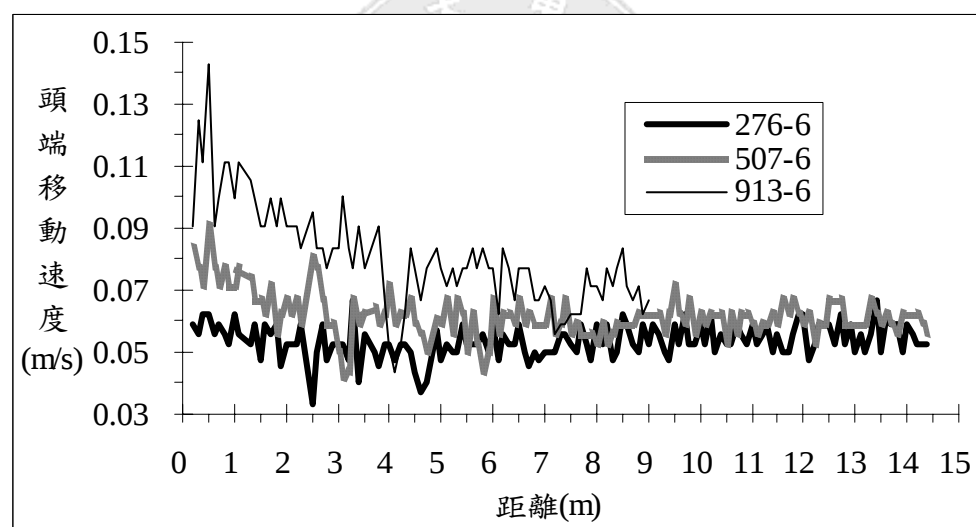


圖 4-3 不同流量對頭速的影響(定量流)

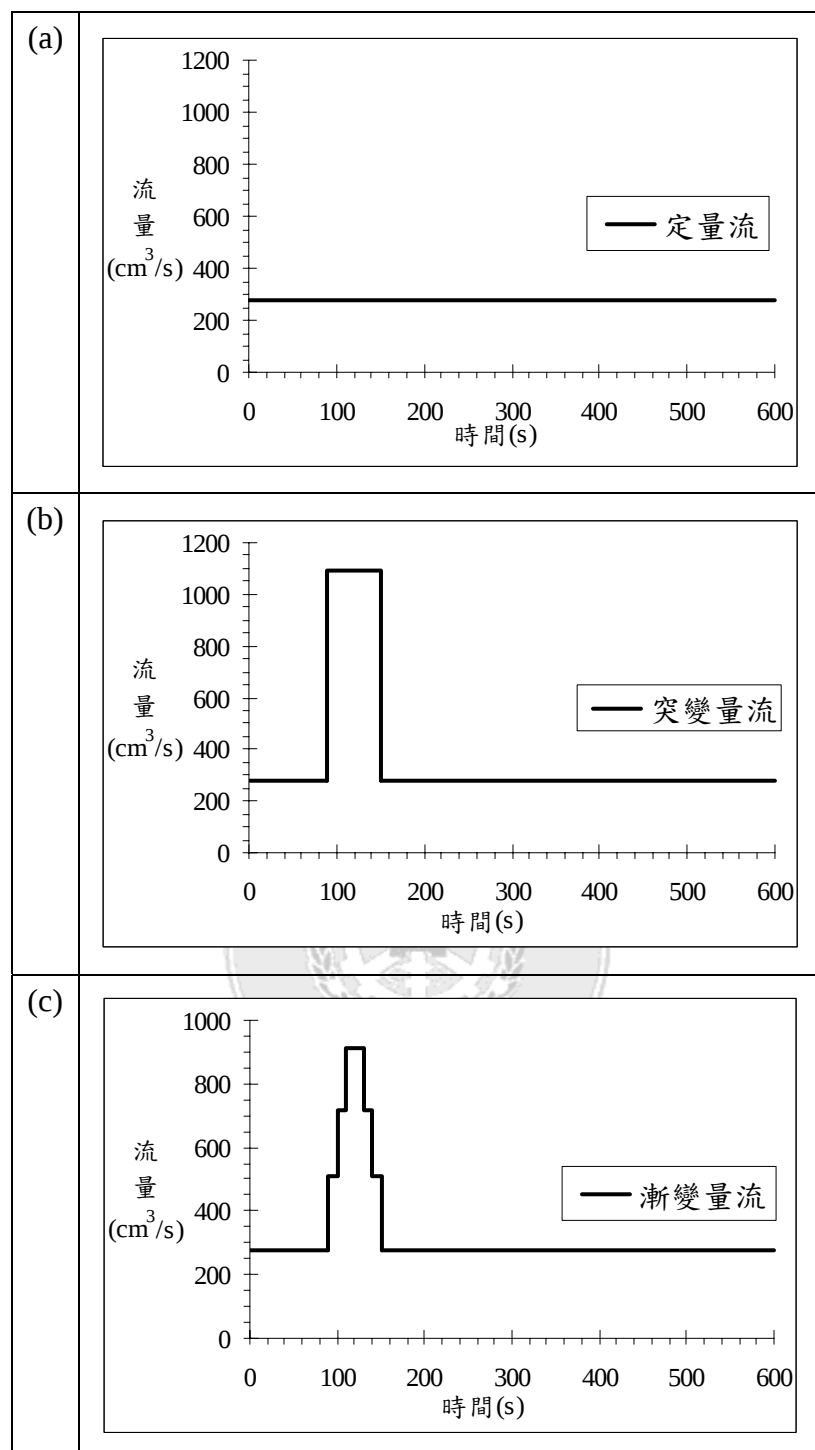


圖 4-4 三種流況的入流量歷線：(a)定量流，(b)突變量流，(c)漸變量流

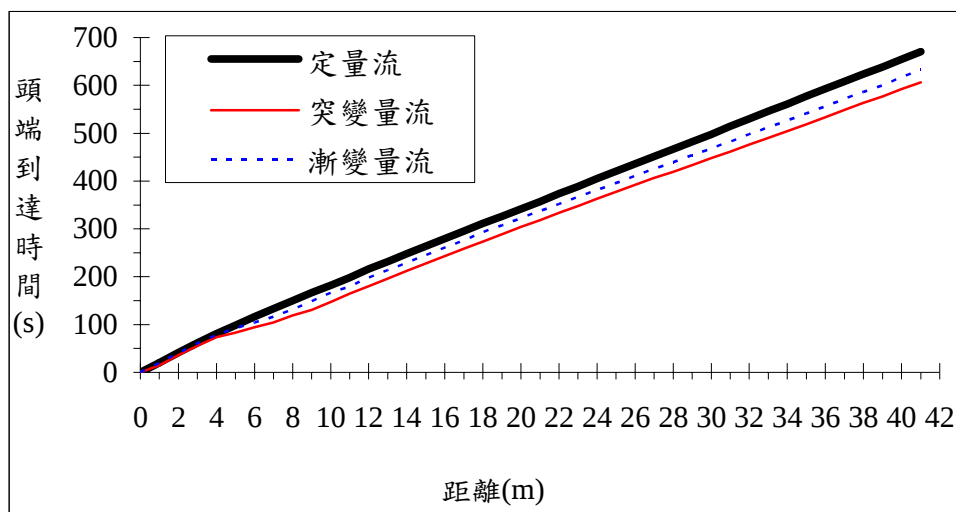


圖 4-5 頭端到達時間與距離關係圖(目視記錄頭端移動)

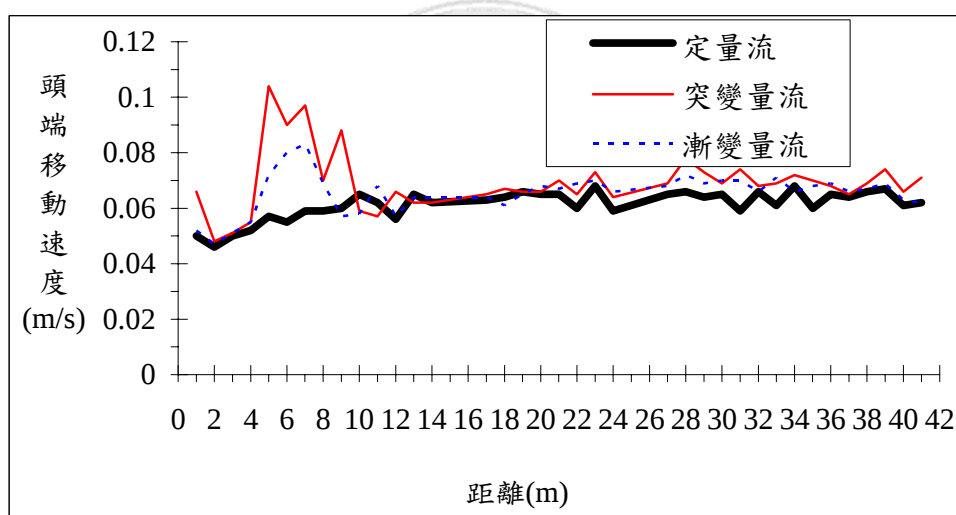


圖 4-6 頭端速度趨勢圖(目視記錄頭端移動)

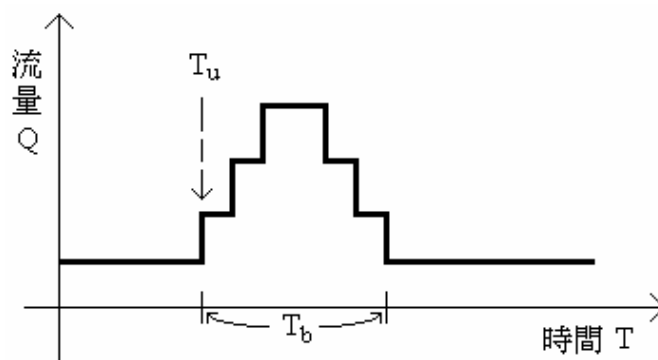


圖 4-7 符號定義圖

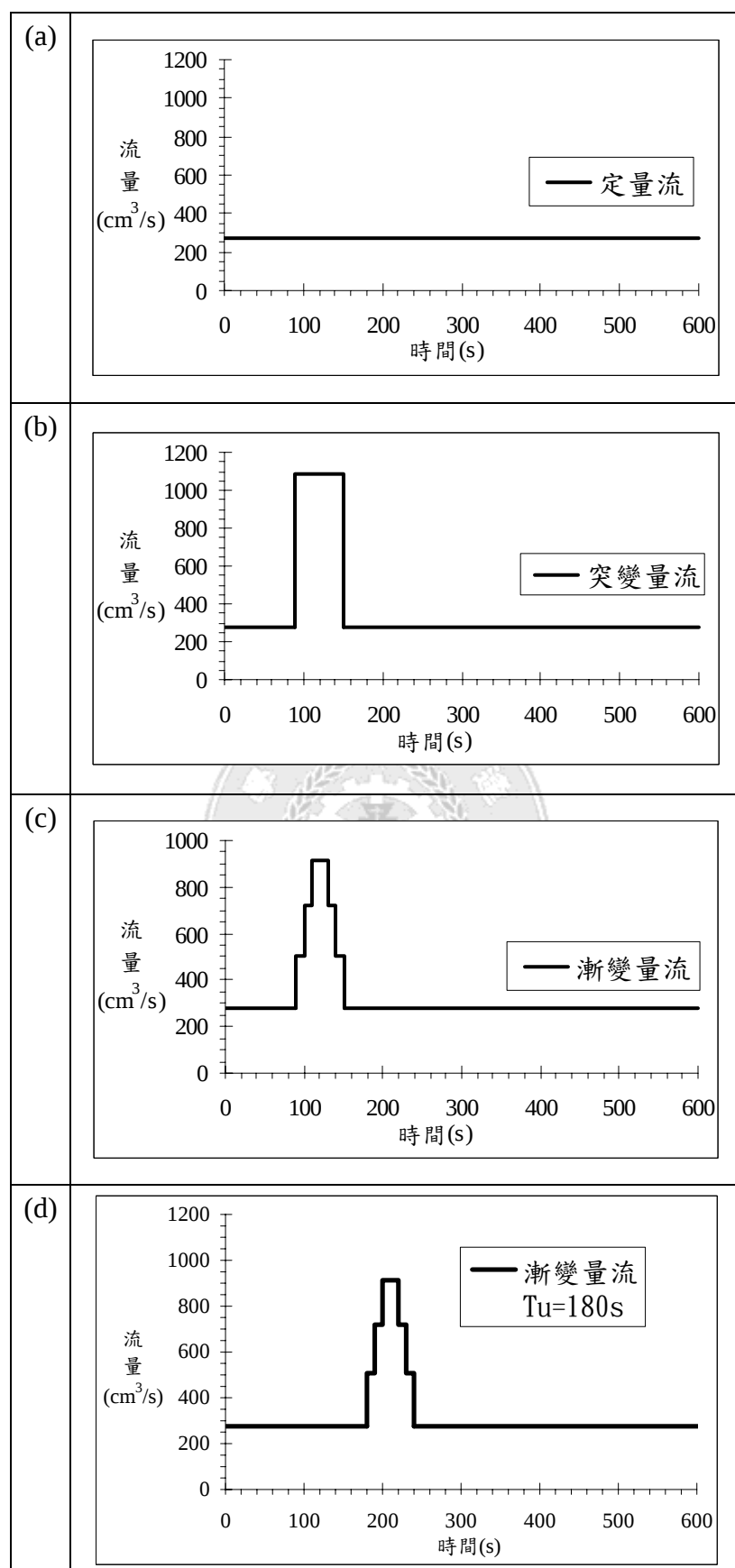


圖 4-8 入流量歷線：(a)定量流，(b)突變量流，(c)漸變量流，(d)漸變量流 $T_u=180\text{s}$

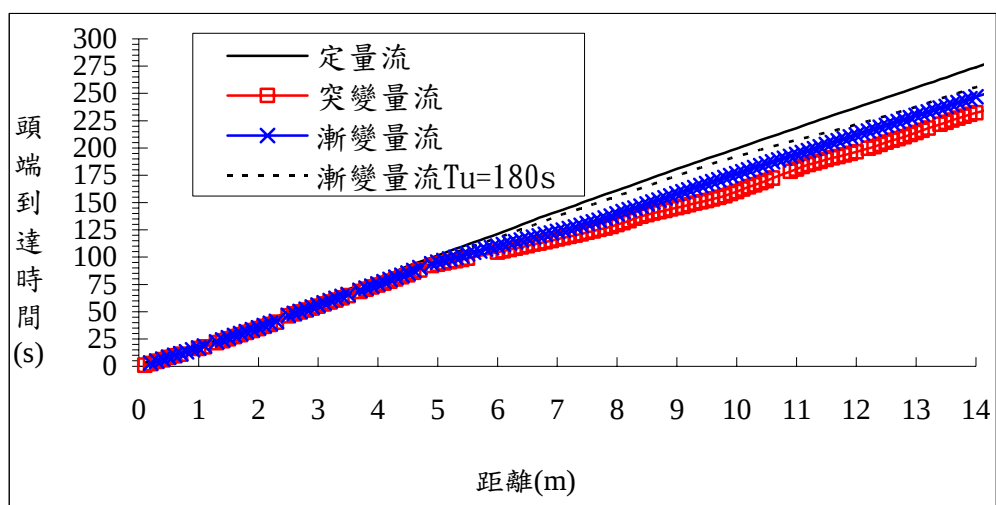


圖 4-9 頭端到達時間與距離關係圖(DV 攝影)

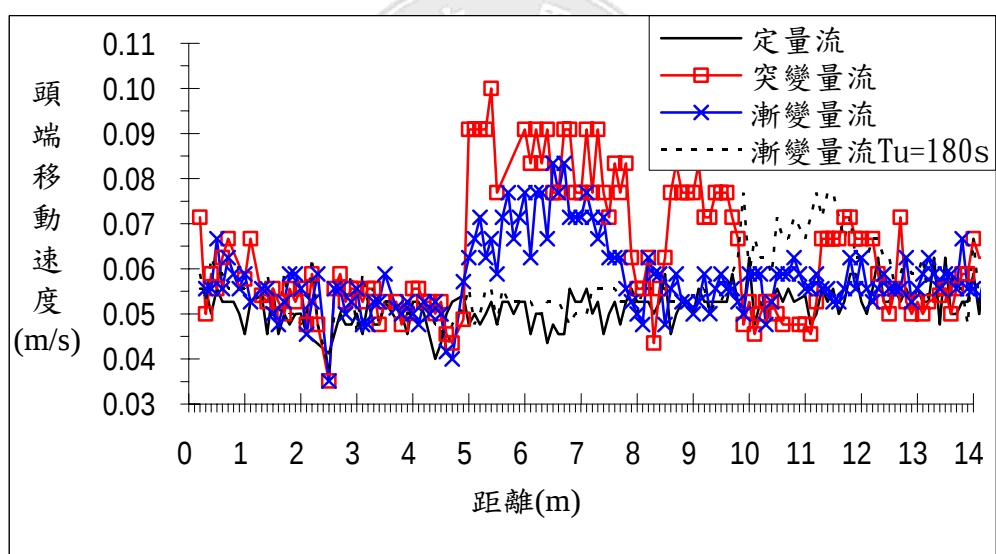


圖 4-10 頭端速度趨勢圖(DV 攝影)

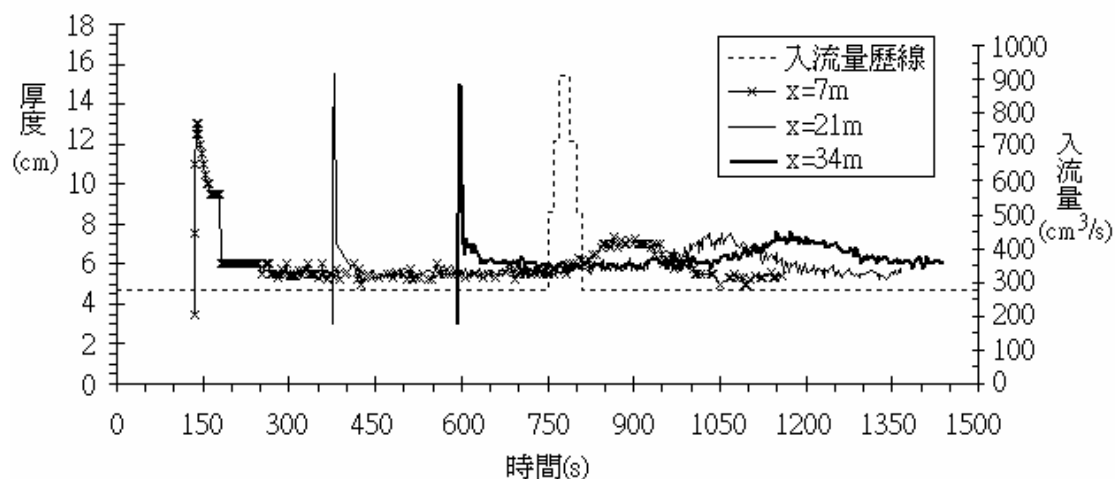


圖 4-11 變量異重流歷時厚度歷線(有基流)

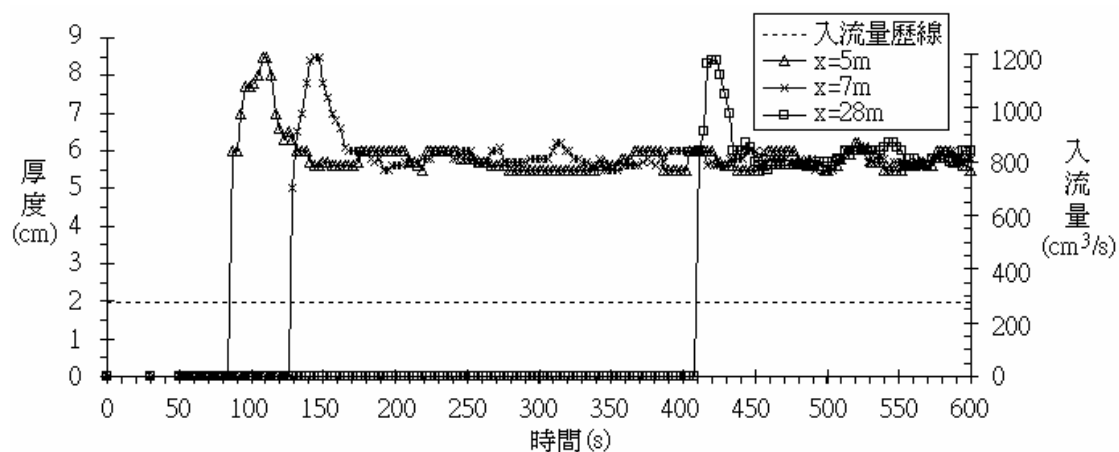


圖 4-12 定量異重流的厚度歷線(無基流)

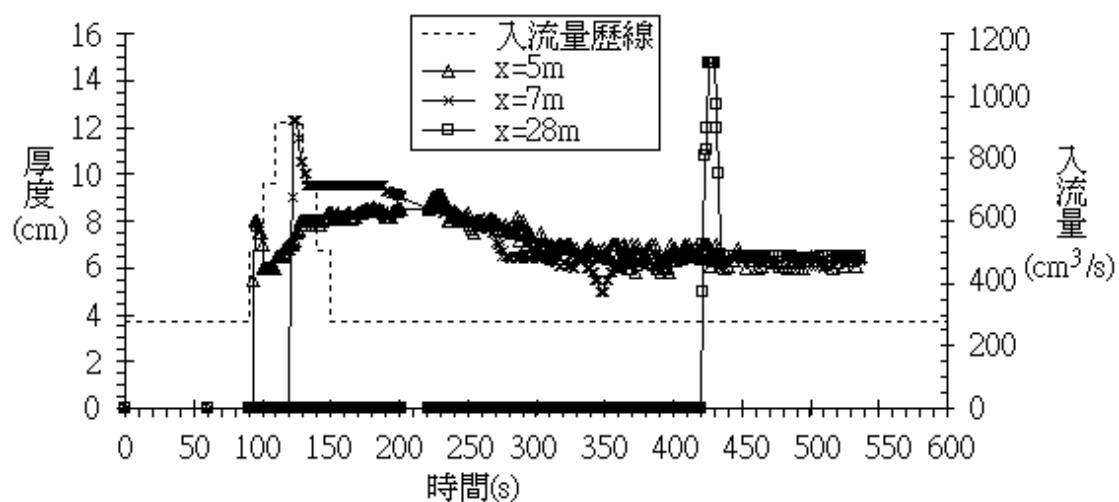


圖 4-13 變量異重流的厚度歷線(無基流)

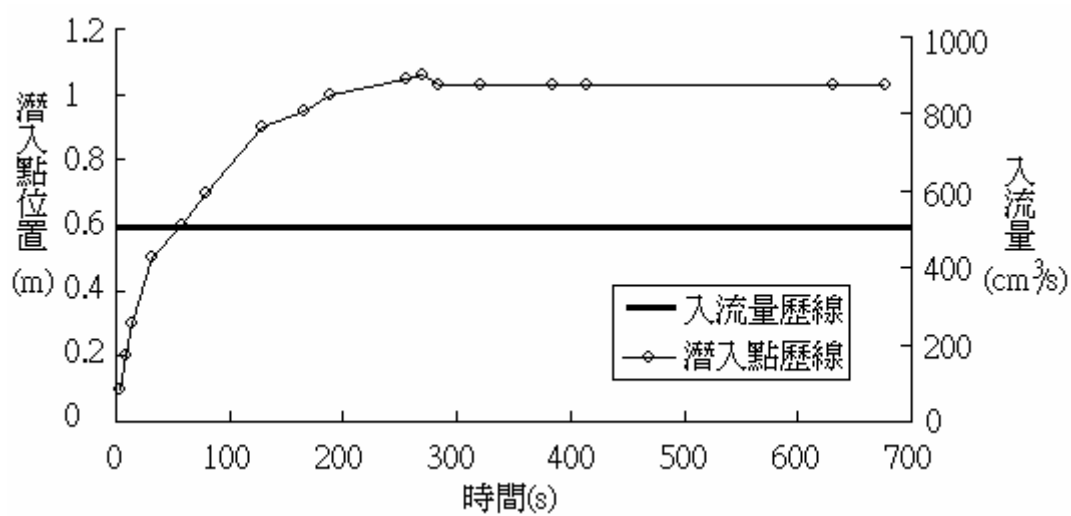


圖 4-14 定量異重流潛入點移位歷程

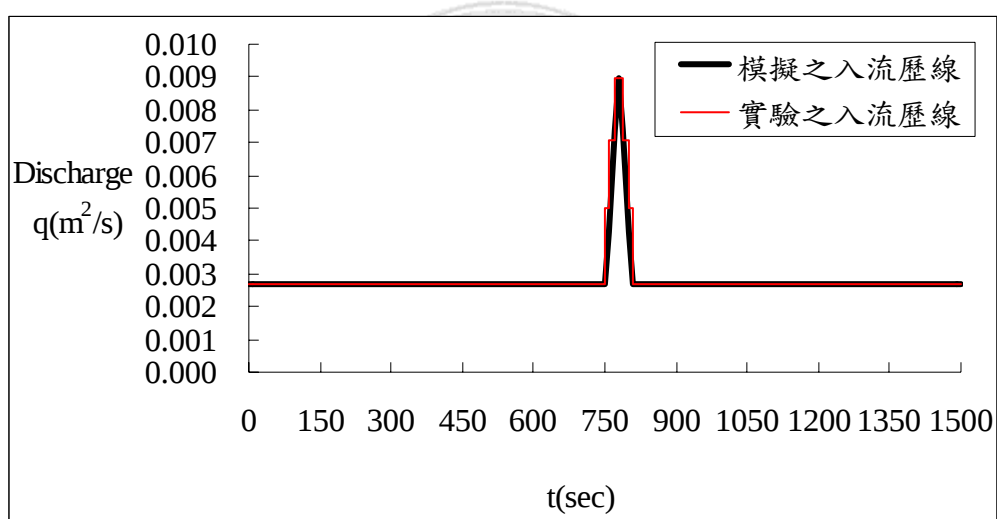


圖 4-16 模擬與實驗入流歷線

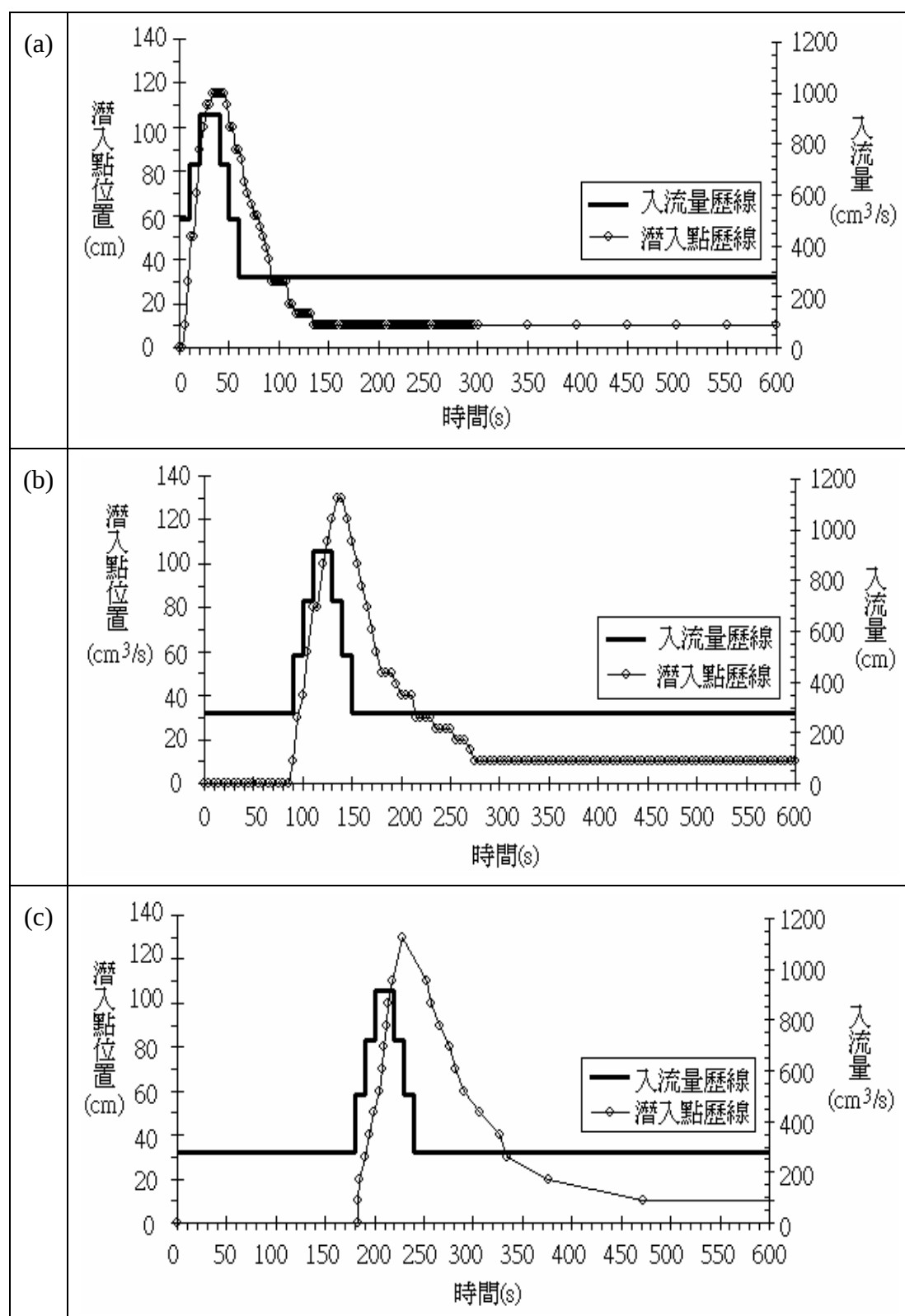


圖 4-15 潛入點歷線：(a)漸變量 $T_u=0s$ ，(b)漸變量 $T_u=90s$ ，(c)漸變量 $T_u=180s$

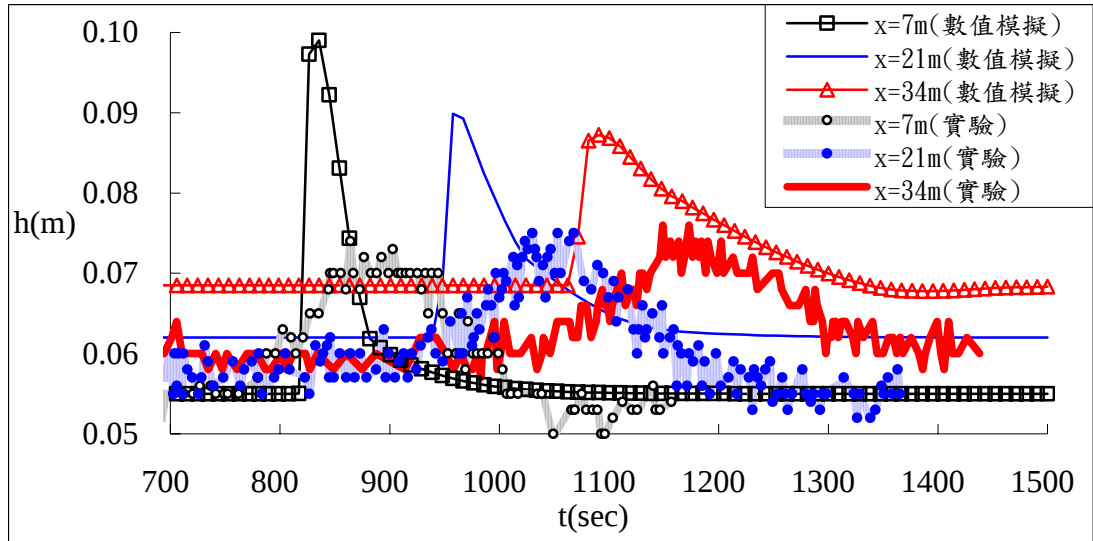


圖 4-17 模擬厚度歷線與實驗值比較圖

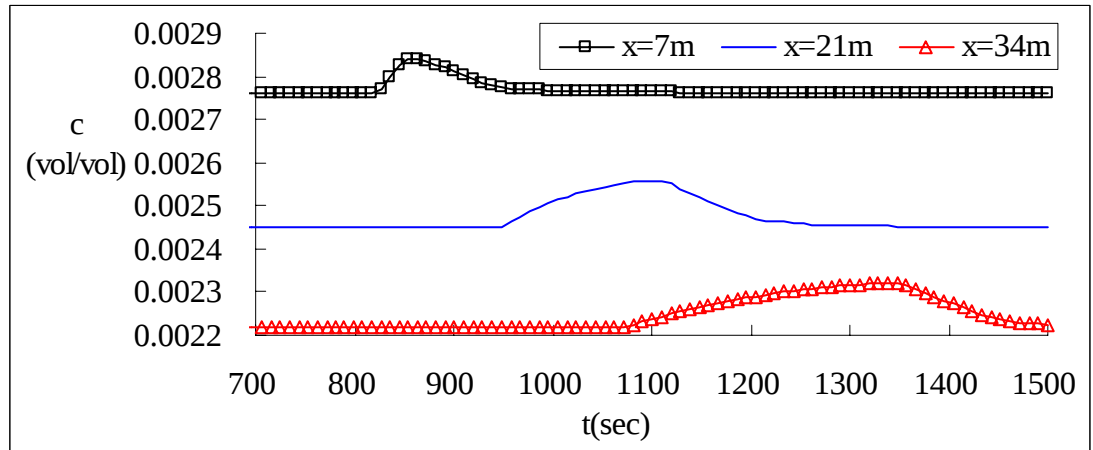


圖 4-18 模擬之濃度歷線

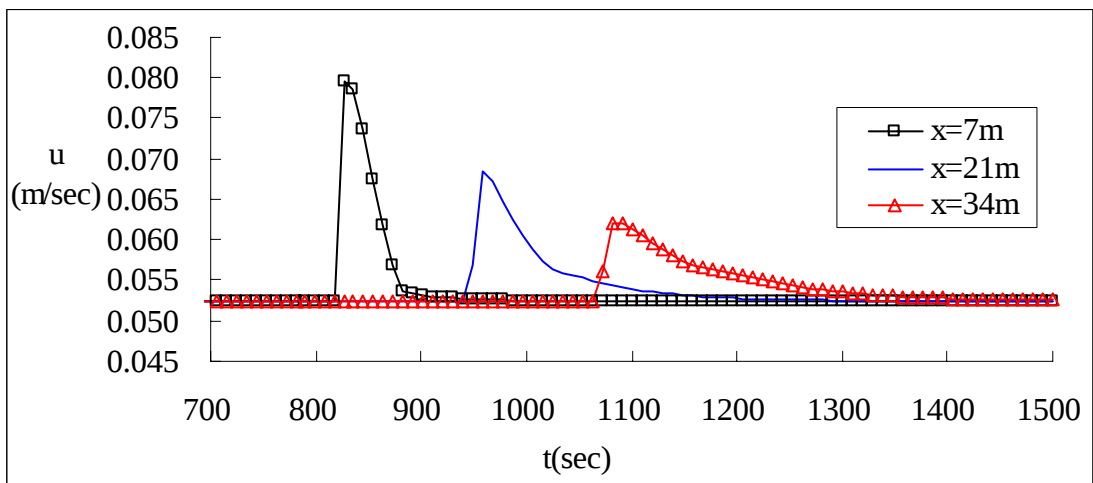


圖 4-19 模擬之流速歷線

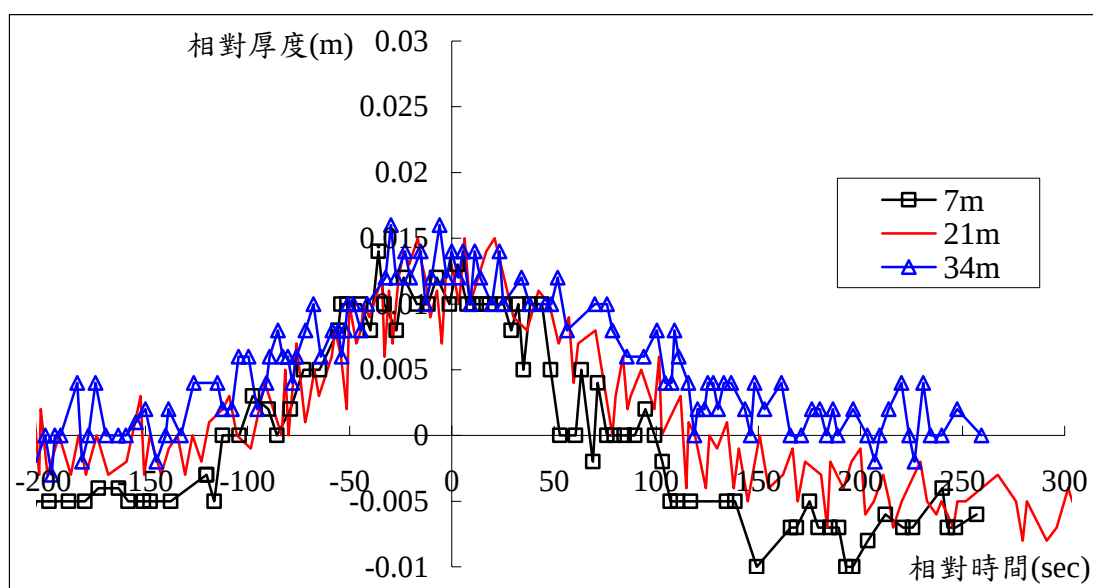


圖 4-20 實驗之波形變化

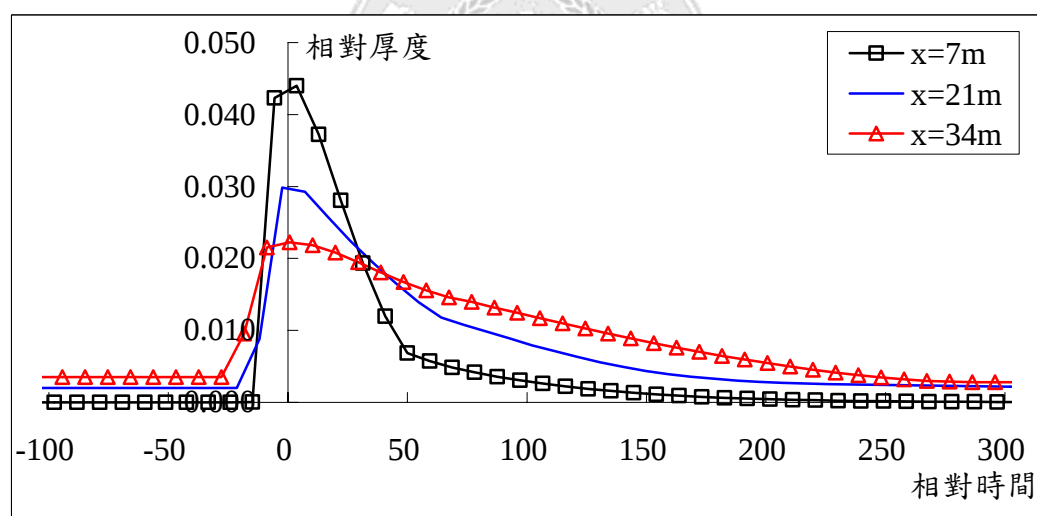


圖 4-21 模擬之波形變化

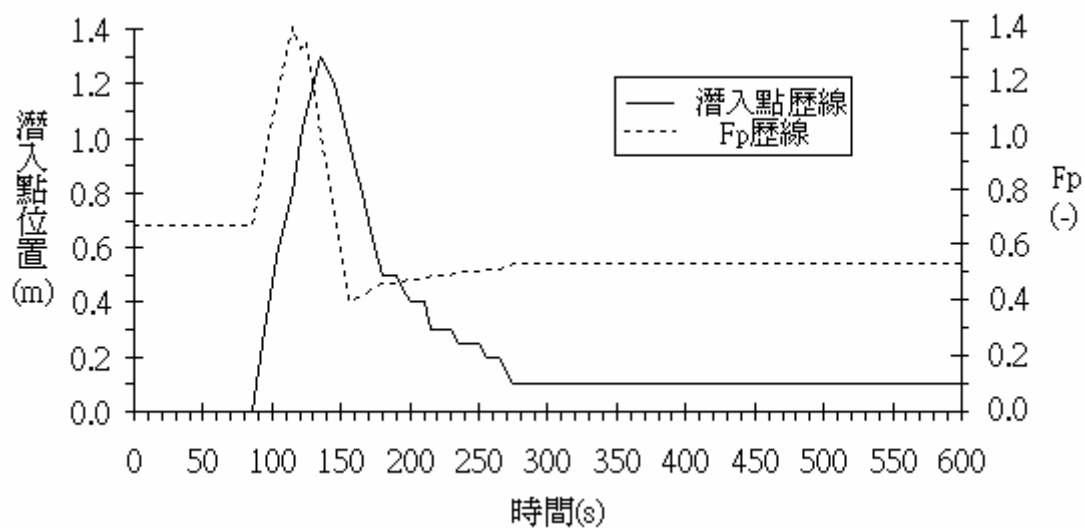


圖 4-22 潛入點與 F_p 關係圖

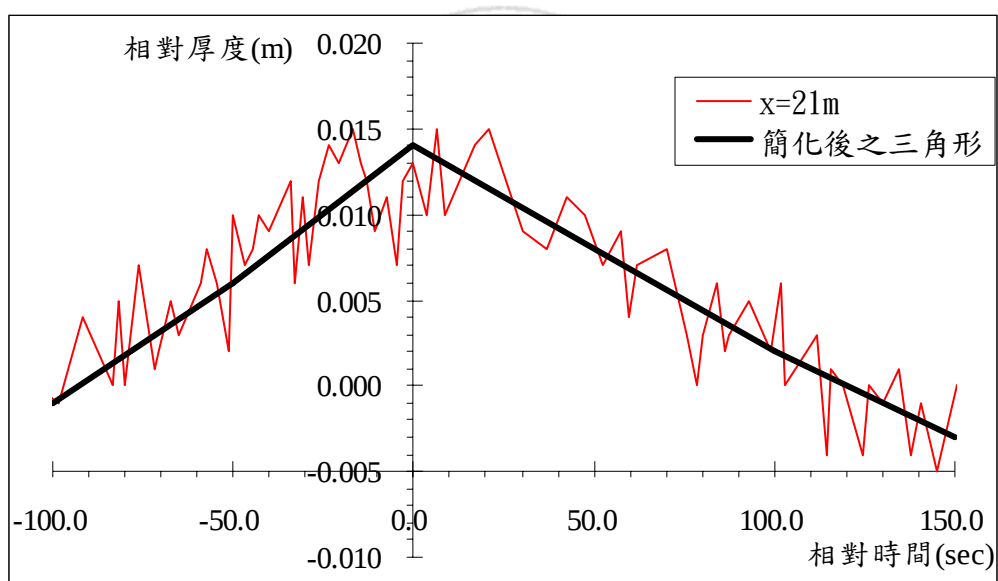


圖 4-23 波形簡化成三角形

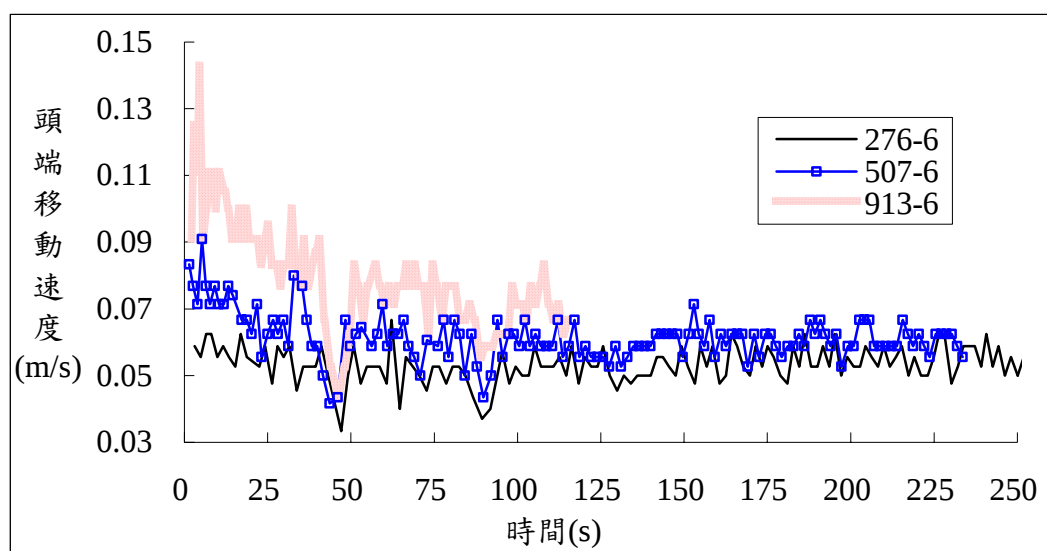
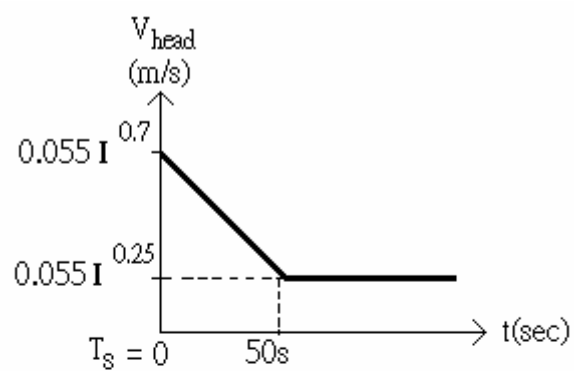
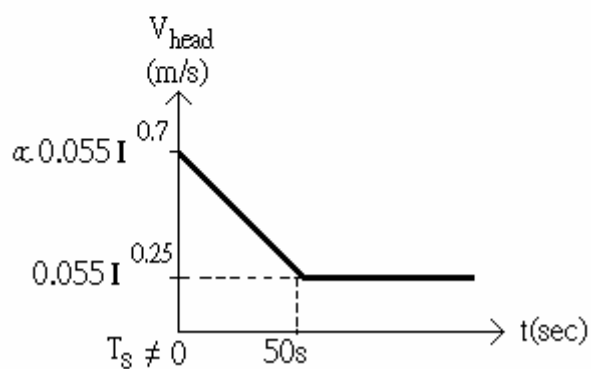


圖 4-24 不同流量頭速歷線



(a)



(b)

圖 4-25 頭速公式示意圖：(a) $T_s = 0$ ，(b) $T_s \neq 0$

表 3-1 實驗渠道的寬度與坡度

第一直線段				第二直線段			第三直線段		
距離 (m)	寬度 (cm)	水深 (cm)	坡度 (-)	距離 (m)	水深 (cm)	坡度 (-)	距離 (m)	水深 (cm)	坡度 (-)
0.10	10.00	9.30	-	17.0	36.25	-	27.00	56.00	-
0.50	10.00	10.25	0.024	17.50	37.15	0.018	27.50	57.15	0.023
1.00	10.00	11.40	0.023	18.00	38.20	0.021	28.00	58.10	0.019
1.50	10.00	12.35	0.019	18.30	38.70	0.017	28.50	59.00	0.018
2.00	10.10	13.45	0.022	18.50	39.10	0.020	29.00	59.90	0.018
2.50	10.25	14.50	0.021	19.00	40.10	0.020	29.50	61.00	0.022
3.00	10.20	15.50	0.020	19.50	41.00	0.018	30.00	62.00	0.020
3.50	10.20	16.60	0.022	20.00	42.00	0.020	30.50	63.00	0.020
4.00	10.20	17.60	0.020	20.50	42.90	0.018	31.00	64.00	0.020
4.50	10.25	18.70	0.022	21.00	43.80	0.018	31.50	65.00	0.020
5.00	10.30	19.65	0.019	21.50	44.90	0.022	32.00	66.00	0.020
5.50	10.30	20.60	0.019	21.80	45.50	0.020	32.50	67.00	0.020
6.00	10.20	21.60	0.020	22.00	45.80	0.015	33.10	68.20	0.020
6.50	10.20	22.60	0.020	22.50	46.80	0.020	33.50	69.00	0.020
7.00	10.20	23.55	0.019	23.00	47.80	0.020	34.00	70.00	0.020
7.50	10.00	24.55	0.020	23.50	48.90	0.022	34.50	70.80	0.018
8.00	10.00	25.45	0.018	24.00	49.90	0.020	35.00	72.00	0.024
8.50	10.00	26.40	0.019	24.50	50.80	0.018	35.50	72.90	0.018
9.00	10.20	27.35	0.019				36.00	73.90	0.020
9.50	10.20	28.35	0.020				36.50	74.60	0.014
10.00	10.00	29.20	0.017				37.00	75.60	0.020
10.50	10.00	30.25	0.021				37.50	76.60	0.020
11.00	10.10	31.30	0.021				38.00	77.60	0.020
11.50	10.20	32.25	0.019				38.50	78.70	0.022
12.00	10.30	33.20	0.019				39.00	80.00	0.026
12.50	10.20	34.10	0.018				39.50	81.00	0.020
13.00	10.20	35.00	0.018				40.00	82.00	0.020
13.50	10.10	35.90	0.018				40.50	83.00	0.020
14.00	10.20	36.60	0.014				41.00	84.00	0.020
14.30	10.20	37.00	0.013						

表 3-2 影片與碼錶時間關係

碼錶讀數 (秒)	45.3	49.1	55.1	60.1	68.0	75.5	89.4	102.4	308.8	584.7
攝影機時間 (秒)	13.9	17.7	23.7	28.7	36.6	44.1	58.0	71.0	277.4	553.3
二者差異 (秒)	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4

表 3-3 電壓與流量對應表

電壓(V)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
流量(cm^3/s)	27	276	507	719	913	1090	1248	1388	1510	1614

表 4-1(1) 三種流況的實驗記錄(目視記錄頭端移動)

距進水口 距離(m)	到達時間 定量流(s)	到達時間 突變量流(s)	到達時間 漸變量流(s)	移動速度 定量流(m/s)	移動速度 突變量流(m/s)	移動速度 漸變量流(m/s)
0	0	0	0	-	-	-
1	20.11	15.06	19.16	0.050	0.066	0.052
2	41.64	35.88	40.43	0.046	0.048	0.047
3	61.62	55.34	60.2	0.050	0.051	0.051
4	80.92	73.56	78.43	0.052	0.055	0.055
5	98.36	83.17	92.27	0.057	0.104	0.072
6	116.51	94.33	104.83	0.055	0.090	0.080
7	133.34	104.69	116.83	0.059	0.097	0.083
8	150.18	119.06	131.32	0.059	0.070	0.069
9	166.71	130.47	148.73	0.060	0.088	0.057
10	182.17	147.35	165.83	0.065	0.059	0.058
11	198.41	164.88	180.45	0.062	0.057	0.068
12	216.19	180	197.85	0.056	0.066	0.057
13	231.57	196.26	213.49	0.065	0.062	0.064
14	247.68	212.29	229.13	0.062	0.062	0.064
彎道						
17	295.66	258.5	276.19	0.063	0.065	0.064
18	311.17	273.5	292.45	0.064	0.067	0.061
19	326.41	288.76	307.75	0.066	0.066	0.065

表 4-1(2) 三種流況的實驗記錄(目視記錄頭端移動)

距進水口 距離(m)	到達時間 定量流(s)	到達時間 突變量流(s)	到達時間 漸變量流(s)	移動速度 定量流(m/s)	移動速度 突變量流(m/s)	移動速度 漸變量流(m/s)
20	341.68	303.88	322.45	0.065	0.066	0.068
21	357.02	318.12	337.43	0.065	0.070	0.067
22	373.69	333.55	351.83	0.060	0.065	0.069
23	388.41	347.33	366.17	0.068	0.073	0.070
24	405.31	362.96	381.43	0.059	0.064	0.066
彎道						
27	451.69	406.7	425.65	0.065	0.069	0.068
28	466.79	419.56	439.56	0.066	0.078	0.072
29	482.34	433.3	454.11	0.064	0.073	0.069
30	497.69	447.83	468.34	0.065	0.069	0.070
31	514.51	461.32	482.56	0.059	0.074	0.070
32	529.56	475.96	497.62	0.066	0.068	0.066
33	545.97	490.43	511.7	0.061	0.069	0.071
34	560.68	504.3	526.79	0.068	0.072	0.066
35	577.47	518.67	541.45	0.060	0.070	0.068
36	592.84	533.27	555.96	0.065	0.068	0.069
37	608.41	548.69	571.09	0.064	0.065	0.066
38	623.5	563.13	586.11	0.066	0.069	0.067
39	638.36	576.67	600.52	0.067	0.074	0.069
40	654.63	591.92	616.42	0.061	0.066	0.063
41	670.67	606.02	632.64	0.062	0.071	0.062

表 4-2(1-1) 變量異重流頭端到達時間記錄(DV 攝影)

(編號 SH-1) 定量流況 $Q=276\text{ cm}^3/\text{s}$, 進水口 10cm 處水深 9.3cm, 入流鹽水濃度 6.39g/l。											
X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)
0.1	0.9	-	4	80.6	0.0526	7.4	149.7	0.0455	10.6	210.8	0.0526
0.2	2.7	0.0556	4.1	82.5	0.0526	7.5	151.7	0.0500	10.7	212.6	0.0556
0.3	4.5	0.0556	4.2	84.5	0.0500	7.6	153.6	0.0526	10.8	214.5	0.0526
0.4	6.5	0.0500	4.4	89.5	0.0400	7.7	155.7	0.0476	11	218.2	0.0541
0.5	8.3	0.0556	4.5	91.8	0.0435	7.8	157.6	0.0526	11.1	220.3	0.0476
0.6	10.2	0.0526	4.6	93.8	0.0500	7.9	159.4	0.0556	11.2	222.3	0.0500

表 4-2(1-2) 變量異重流頭端到達時間記錄(DV 攝影)

(SH-1)定量 $Q=276\text{ cm}^3/\text{s}$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。											
X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)
0.8	14	0.0526	4.7	95.7	0.0526	8	161.3	0.0526	11.3	224.1	0.0556
0.9	16	0.0500	4.9	99.4	0.0541	8.1	163.2	0.0526	11.4	226	0.0526
1	18.2	0.0455	5	101.5	0.0476	8.2	165.1	0.0526	11.5	227.8	0.0556
1.1	20.1	0.0526	5.1	103.5	0.0500	8.3	167.1	0.0500	11.6	229.8	0.0500
1.3	23.8	0.0541	5.2	105.6	0.0476	8.4	169	0.0526	11.7	231.7	0.0526
1.4	26	0.0455	5.3	107.6	0.0500	8.5	170.7	0.0588	11.8	233.4	0.0588
1.5	27.8	0.0556	5.4	109.5	0.0526	8.6	172.9	0.0455	11.9	235.1	0.0588
1.6	30	0.0455	5.5	111.6	0.0476	8.7	174.9	0.0500	12	237	0.0526
1.7	32	0.0500	5.6	113.5	0.0526	8.8	176.8	0.0526	12.1	239	0.0500
1.8	34.1	0.0476	5.7	115.4	0.0526	8.9	178.7	0.0526	12.2	240.8	0.0556
1.9	36.1	0.0500	5.8	117.4	0.0500	9	180.7	0.0500	12.3	242.4	0.0625
2	38.1	0.0500	5.9	119.3	0.0526	9.1	182.5	0.0556	12.4	244.3	0.0526
2.1	40.3	0.0455	6	121.2	0.0526	9.2	184.4	0.0526	12.5	246.2	0.0526
2.5	50	0.0412	6.1	123.4	0.0455	9.3	186.3	0.0526	12.6	248	0.0556
2.7	54	0.0500	6.2	125.4	0.0500	9.4	188.2	0.0526	12.7	249.9	0.0526
2.8	56.1	0.0476	6.3	127.4	0.0500	9.5	190.1	0.0526	12.8	251.7	0.0556
2.9	58.2	0.0476	6.4	129.7	0.0435	9.6	192	0.0526	12.9	253.6	0.0526
3	60.2	0.0500	6.5	131.8	0.0476	9.7	193.7	0.0588	13	255.4	0.0556
3.1	62.4	0.0455	6.6	134	0.0455	9.8	195.6	0.0526	13.1	257.3	0.0526
3.2	64.3	0.0526	6.7	136.2	0.0455	9.9	197.6	0.0500	13.2	259.2	0.0526
3.3	66.4	0.0476	6.8	138	0.0556	10	199.2	0.0625	13.3	260.8	0.0625
3.4	68.5	0.0476	6.9	139.9	0.0526	10.1	201.3	0.0476	13.4	262.9	0.0476
3.5	70.4	0.0526	7	141.8	0.0526	10.2	203.2	0.0526	13.5	264.5	0.0625
3.7	74.5	0.0488	7.1	143.6	0.0556	10.3	205.2	0.0500	13.6	266.5	0.0500
3.8	76.5	0.0500	7.2	145.6	0.0500	10.4	207.1	0.0526	13.7	268.5	0.0500
3.9	78.7	0.0455	7.3	147.5	0.0526	10.5	208.9	0.0556	13.8	270.4	0.0526
									13.9	272.3	0.0526
									14	274	0.0588
									14.1	276	0.0500
									14.2	277.7	0.0588
									14.3	279.3	0.0625
									14.4	281.3	0.0500

表 4-2(2-1) 變量異重流頭端到達時間記錄(DV 攝影)

(SH-2)突變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。

X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)
0.1	0.9	-	3.9	72.4	0.0500	7.7	125.2	0.0769	11.2	184.7	0.0526
0.2	2.3	0.0714	4	74.2	0.0556	7.8	126.4	0.0833	11.3	186.2	0.0667
0.3	4.3	0.0500	4.1	76	0.0556	7.9	128	0.0625	11.4	187.7	0.0667
0.4	6	0.0588	4.2	77.9	0.0526	8	129.8	0.0556	11.5	189.2	0.0667
0.5	7.8	0.0556	4.3	79.8	0.0526	8.1	131.6	0.0556	11.6	190.7	0.0667
0.6	9.4	0.0625	4.4	81.8	0.0500	8.2	133.2	0.0625	11.7	192.1	0.0714
0.7	10.9	0.0667	4.5	83.7	0.0526	8.3	135.5	0.0435	11.8	193.5	0.0714
1	16.1	0.0577	4.6	85.9	0.0455	8.4	137.3	0.0556	11.9	195	0.0667
1.1	17.6	0.0667	4.7	88.2	0.0435	8.5	138.9	0.0625	12	196.5	0.0667
1.3	21.3	0.0541	4.9	92.3	0.0488	8.6	140.2	0.0769	12.2	199.5	0.0667
1.4	23.2	0.0526	5	93.4	0.0909	8.7	141.4	0.0833	12.3	201.2	0.0588
1.5	25	0.0556	5.1	94.5	0.0909	8.8	142.7	0.0769	12.4	203.1	0.0526
1.6	26.9	0.0526	5.2	95.6	0.0909	8.9	144	0.0769	12.5	205.1	0.0500
1.7	28.9	0.0500	5.3	96.7	0.0909	9	145.3	0.0769	12.6	206.9	0.0556
1.8	30.7	0.0556	5.4	97.7	0.1000	9.1	146.5	0.0833	12.7	208.3	0.0714
1.9	32.6	0.0526	5.5	99	0.0769	9.2	147.9	0.0714	12.8	210.2	0.0526
2	34.4	0.0556	6	104.5	0.0909	9.3	149.3	0.0714	12.9	212.2	0.0500
2.1	36.5	0.0476	6.1	105.7	0.0833	9.4	150.6	0.0769	13	214.1	0.0526
2.2	38.2	0.0588	6.2	106.8	0.0909	9.5	151.9	0.0769	13.1	216.1	0.0500
2.3	40.3	0.0476	6.3	108	0.0833	9.6	153.2	0.0769	13.2	218	0.0526
2.5	46	0.0351	6.4	109.1	0.0909	9.7	154.6	0.0714	13.4	221.7	0.0541
2.6	47.8	0.0556	6.5	110.4	0.0769	9.8	156.1	0.0667	13.5	223.5	0.0556
2.7	49.5	0.0588	6.6	111.7	0.0769	9.9	158.2	0.0476	13.6	225.5	0.0500
2.8	51.4	0.0526	6.7	112.8	0.0909	10	160.1	0.0526	13.7	227.3	0.0556
2.9	53.2	0.0556	6.8	113.9	0.0909	10.1	162.3	0.0455	13.8	229	0.0588
3	55	0.0556	6.9	115.2	0.0769	10.2	164.3	0.0500	13.9	230.7	0.0588
3.1	56.9	0.0526	7	116.5	0.0769	10.3	166.2	0.0526	14	232.2	0.0667
3.2	58.7	0.0556	7.1	117.6	0.0909	10.4	168.1	0.0526	14.1	233.8	0.0625
3.3	60.5	0.0556	7.2	118.9	0.0769	10.5	170.1	0.0500	14.2	235.4	0.0625
3.4	62.6	0.0476	7.3	120	0.0909	10.6	172.2	0.0476	14.3	236.9	0.0667
3.5	64.5	0.0526	7.4	121.3	0.0769	10.9	178.5	0.0476	14.4	238.5	0.0625
3.7	68.3	0.0526	7.5	122.7	0.0714	11	180.6	0.0476			
3.8	70.4	0.0476	7.6	123.9	0.0833	11.1	182.8	0.0455			

表 4-2(3-1) 變量異重流頭端到達時間記錄(DV 攝影)

(SH-3)漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。

X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)
0.2	3	-	3.8	71.6	0.0500	7.2	126.3	0.0714	10.5	185.6	0.0588
0.3	4.8	0.0556	3.9	73.5	0.0526	7.3	127.8	0.0667	10.6	187.3	0.0588
0.4	6.6	0.0556	4	75.5	0.0500	7.4	129.2	0.0714	10.7	189	0.0588
0.5	8.1	0.0667	4.1	77.6	0.0476	7.5	130.8	0.0625	10.8	190.6	0.0625
0.6	9.9	0.0556	4.2	79.5	0.0526	7.6	132.4	0.0625	10.9	192.3	0.0588
0.7	11.5	0.0625	4.3	81.5	0.0500	7.7	134	0.0625	11	194.1	0.0556
0.8	13.2	0.0588	4.4	83.4	0.0526	7.8	135.8	0.0556	11.1	195.9	0.0556
0.9	15	0.0556	4.5	85.4	0.0500	7.9	137.7	0.0526	11.2	197.6	0.0588
1	16.7	0.0588	4.6	87.8	0.0417	8	139.7	0.0500	11.3	199.4	0.0556
1.1	18.6	0.0526	4.7	90.3	0.0400	8.1	141.8	0.0476	11.4	201.2	0.0556
1.3	22.2	0.0556	4.9	93.8	0.0571	8.2	143.4	0.0625	11.5	203.1	0.0526
1.4	24	0.0556	5	95.4	0.0625	8.3	145.1	0.0588	11.6	205	0.0526
1.5	26	0.0500	5.1	96.9	0.0667	8.4	146.8	0.0588	11.7	206.8	0.0556
1.6	28.1	0.0476	5.2	98.3	0.0714	8.5	148.9	0.0476	11.8	208.4	0.0625
1.7	30	0.0526	5.3	99.9	0.0625	8.6	150.7	0.0556	11.9	210.2	0.0556
1.8	31.7	0.0588	5.4	101.4	0.0667	8.7	152.4	0.0588	12	211.8	0.0625
1.9	33.4	0.0588	5.5	103.1	0.0588	8.8	154.3	0.0526	12.1	213.6	0.0556
2	35.2	0.0556	5.6	104.5	0.0714	8.9	156.2	0.0526	12.2	215.5	0.0526
2.1	37.4	0.0455	5.7	105.8	0.0769	9	158.2	0.0500	12.3	217.3	0.0556
2.2	39.3	0.0526	5.8	107.3	0.0667	9.1	160.1	0.0526	12.4	219	0.0588
2.3	41	0.0588	5.9	108.7	0.0714	9.2	161.8	0.0588	12.5	220.8	0.0556
2.5	46.7	0.0351	6	110	0.0769	9.3	163.8	0.0500	12.6	222.6	0.0556
2.6	48.5	0.0556	6.1	111.6	0.0625	9.4	165.6	0.0556	12.7	224.4	0.0556
2.7	50.3	0.0556	6.2	112.9	0.0769	9.5	167.3	0.0588	12.8	226	0.0625
2.8	52.3	0.0500	6.3	114.2	0.0769	9.6	169.1	0.0556	12.9	227.9	0.0526
2.9	54.2	0.0526	6.4	115.7	0.0667	9.7	170.9	0.0556	13	229.7	0.0556
3	56	0.0556	6.5	116.9	0.0833	9.8	172.8	0.0526	13.1	231.4	0.0588
3.1	58.1	0.0476	6.6	118.2	0.0769	9.9	174.8	0.0500	13.2	233	0.0625
3.2	60.2	0.0476	6.7	119.4	0.0833	10	176.5	0.0588	13.3	234.7	0.0588
3.3	62.1	0.0526	6.8	120.8	0.0714	10.1	178.2	0.0588	13.4	236.5	0.0556
3.4	64	0.0526	6.9	122.2	0.0714	10.2	179.9	0.0588	13.5	238.2	0.0588
3.5	65.7	0.0588	7	123.6	0.0714	10.3	182	0.0476	13.6	239.9	0.0588
3.7	69.6	0.0513	7.1	124.9	0.0769	10.4	183.9	0.0526	13.7	241.7	0.0556

表 4-2(3-1) 變量異重流頭端到達時間記錄(DV 攝影)

(SH-3)漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。

X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)
									13.8	243.2	0.0667
									13.9	245	0.0556
									14	246.8	0.0556
									14.1	248.7	0.0526
									14.2	250.4	0.0588
									14.3	252.2	0.0556
									14.4	253.9	0.0588

表 4-2(4-1) 變量異重流頭端到達時間記錄(DV 攝影)

(SH-4)漸變量 $T_u = 180s$ 、 $T_b = 60s$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.13g/l。

X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)
0.1	3.2	-	4.1	80.2	0.0500	7.9	154	0.0556	11.7	216.9	0.0667
0.2	4.9	0.0588	4.2	82.1	0.0526	8	156	0.0500	11.8	218.3	0.0714
0.3	6.8	0.0526	4.3	84.1	0.0500	8.1	157.8	0.0556	11.9	219.9	0.0625
0.4	8.4	0.0625	4.4	86.2	0.0476	8.2	159.6	0.0556	12	221.5	0.0625
0.5	10.1	0.0588	4.5	88.3	0.0476	8.3	161.4	0.0556	12.1	223.1	0.0625
0.6	11.8	0.0588	4.6	90.7	0.0417	8.4	163.2	0.0556	12.2	224.6	0.0667
0.7	13.6	0.0556	4.7	92.8	0.0476	8.5	165	0.0556	12.3	226.1	0.0667
0.8	15.4	0.0556	4.9	96.7	0.0513	8.6	166.9	0.0526	12.4	227.7	0.0625
0.9	17.2	0.0556	5	98.5	0.0556	8.7	168.8	0.0526	12.5	229.3	0.0625
1	19	0.0556	5.1	100.6	0.0476	8.8	170.7	0.0526	12.6	231.1	0.0556
1.1	20.9	0.0526	5.2	102.6	0.0500	8.9	172.6	0.0526	12.7	232.8	0.0588
1.3	24.7	0.0526	5.3	104.4	0.0556	9	174.6	0.0500	12.8	234.4	0.0625
1.4	26.4	0.0588	5.4	106.2	0.0556	9.1	176.4	0.0556	12.9	236.1	0.0588
1.5	28.3	0.0526	5.5	108.3	0.0476	9.2	178.2	0.0556	13	237.8	0.0588
1.6	30.4	0.0476	5.6	110.1	0.0556	9.3	180.2	0.0500	13.1	239.4	0.0625
1.7	32.1	0.0588	5.7	112	0.0526	9.4	182.1	0.0526	13.2	241.3	0.0526
1.8	34.1	0.0500	5.8	113.9	0.0526	9.5	184	0.0526	13.4	245	0.0541
1.9	36.1	0.0500	5.9	115.8	0.0526	9.6	185.8	0.0556	13.5	246.9	0.0526
2	38.2	0.0476	6	117.7	0.0526	9.7	187.5	0.0588	13.6	248.6	0.0588
2.1	40.2	0.0500	6.1	119.6	0.0526	9.8	189.1	0.0625	13.7	250.4	0.0556

表 4-2(4-2) 變量異重流頭端到達時間記錄(DV 攝影)

(SH-4)漸變量 $T_u = 180s$ 、 $T_b = 60s$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.13g/l。

X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)	X (m)	時間 (s)	頭速 (m/s)
2.2	41.8	0.0625	6.2	121.6	0.0500	9.9	190.4	0.0769	13.8	252.2	0.0556
2.3	43.9	0.0476	6.3	123.6	0.0500	10	192.1	0.0588	13.9	254.3	0.0476
2.5	49.2	0.0377	6.4	125.5	0.0526	10.1	193.6	0.0667	14	255.8	0.0667
2.6	51.2	0.0500	6.5	127.4	0.0526	10.2	195.2	0.0625	14.1	257.7	0.0526
2.7	53.2	0.0500	6.6	129.3	0.0526	10.3	196.8	0.0625	14.2	259.7	0.0500
2.8	55.1	0.0526	6.7	131.3	0.0500	10.4	198.5	0.0588			
2.9	56.8	0.0588	6.8	133.4	0.0476	10.5	199.9	0.0714			
3	59	0.0455	6.9	135.4	0.0500	10.6	201.4	0.0667			
3.1	60.7	0.0588	7	137.4	0.0500	10.7	202.9	0.0667			
3.2	62.6	0.0526	7.1	139.4	0.0500	10.8	204.3	0.0714			
3.3	64.4	0.0556	7.2	141.2	0.0556	11	207.3	0.0667			
3.4	66.5	0.0476	7.3	143	0.0556	11.1	208.7	0.0714			
3.5	68.4	0.0526	7.4	144.8	0.0556	11.2	210	0.0769			
3.7	72.2	0.0526	7.5	146.6	0.0556	11.3	211.4	0.0714			
3.8	74.2	0.0500	7.6	148.4	0.0556	11.4	212.7	0.0769			
3.9	76.2	0.0500	7.7	150.3	0.0526	11.5	214	0.0769			
4	78.2	0.0500	7.8	152.2	0.0526	11.6	215.4	0.0714			

表 4-3(1) 變量異重流歷時厚度記錄表(有基流)

(SB-1)		(SB-2)		(SB-3)	
x=7m 厚度(cm)	時間(s)	x=21m 厚度(cm)	時間(s)	x=34m 厚度(cm)	時間(s)
3.5	134.6	3	375	3	595.1
7.5	135.4	6.2	375.4	8.5	595.8
11	136.4	9.5	376.1	11.5	596.6
12.5	137.2	12.2	377	13.5	597.6
13	138.2	15.5	379.4	15	599
12.5	139.6	7	383	13	600.6
13	140.9	6	404	10	601.6
12.5	142.8	5.4	435.2	8	602.8
12	144.8	5.5	438.3	7	604.3
11.5	147.5	5.7	446.7	6.5	605.6

表 4-3(2) 變量異重流歷時厚度記錄表(有基流)

(SB-1)		(SB-2)		(SB-3)	
x=7m 厚度(cm)	時間(s)	x=21m 厚度(cm)	時間(s)	x=34m 厚度(cm)	時間(s)
11	150.5	5.5	450.2	6.8	607.6
10.5	153.2	5.4	454.2	7.3	609.5
10	156.6	5.5	460.3	7	611.1
10	160.7	5.4	468.7	6.8	614
9.5	163.6	5.5	479.5	7	616.4
9.5	166	5.7	490.5	6.6	619
9.5	170.5	5.6	496.9	7	621.6
9.5	172.8	5.8	499.9	6.6	626.3
9.5	175.4	5.7	507.3	6.6	628
9.5	179.5	5.6	513.5	6.4	630.8
6	182.3	5.5	521.7	6	635.3
6	183.9	5.5	533.8	6.2	640.8
6	185.5	5.6	537.2	6	643.9
6	186.8	5.7	540.7	6.2	647.6
6	188.7	5.6	550.4	6.2	652.3
6	192.1	5.8	557	6	659.2
6	194.5	5.7	560.7	6	663.3
6	195.9	5.9	568.7	6	670.3
6	199.3	5.7	572.2	6	673.2
6	200.3	5.9	583.3	6.2	675.7
6	203.4	5.5	590.2	6	676.4
6	206	5.6	596.4	6	689.7
6	207.5	5.7	598.7	6	694.2
6	210.3	5.4	603.4	6.2	701.2
6	213.2	5.8	607	6.4	705.5
6	216.9	5.4	612.1	6	710.5
6	219.4	5.5	617.5	6	718
6	224.6	5.7	620	6	723.2
6	229	5.4	626.7	6	728.5
6	234	5.8	631	5.8	734.4
6	238.5	5.5	634.1	6	741.3
6	241	5.6	642.6	5.8	747.4
6	244.1	5.7	649.8	6	751.5

表 4-3(3) 變量異重流歷時厚度記錄表(有基流)

(SB-1)		(SB-2)		(SB-3)	
x=7m 厚度(cm)	時間(s)	x=21m 厚度(cm)	時間(s)	x=34m 厚度(cm)	時間(s)
6	247.8	5.5	658.3	5.8	760.9
5.5	253.9	5.4	661.9	6	769.8
6	257.5	5.7	665.5	6	771.5
6	258.9	5.7	675.1	6	778.1
6	261.3	5.5	679.7	5.9	782.8
6	264.3	5.7	690.3	5.8	786.8
5.5	268.1	5.7	694.4	5.8	791.4
5.5	272.1	6	699.4	6	801.4
5.5	276	5.5	702.9	5.8	805.5
5.5	278.9	6	703.7	6	812.3
5.3	281.8	5.6	705.9	6	823.2
5.8	286.1	6	707.2	5.8	827
5.5	290.1	5.5	710.7	6	834.2
6	294.2	6	711.8	5.8	848.6
5.5	296.9	5.8	715.4	6	860.6
5.4	300.7	5.7	720	5.8	874.6
5.5	303.3	5.5	725.4	6	887.4
5.4	306.1	5.7	728.4	5.8	913.8
5.4	308.3	6.1	731.4	6	921.5
5.4	311.9	5.9	734.1	6.2	927.6
5.5	314.2	5.6	739.1	6.2	942.6
5.7	316.2	5.7	748.1	6	951
5.5	318.9	5.9	757	5.8	958.3
5.7	321.9	5.6	763.7	6	964.7
5.6	325.7	5.8	767.3	5.8	970.9
5.7	330.7	5.9	774.1	5.8	975.4
6	332.9	5.7	779.7	6	980
5.5	335.4	6	780.6	5.7	983.1
5.5	339.6	5.5	783.7	6	984.7
5.5	340.7	5.7	794.6	6	987.4
5.5	342.6	5.8	798.8	6.4	995.6
5.5	345.6	6	805	5.8	998
5.3	350.2	5.8	808.8	6	1001.1

表 4-3(4) 變量異重流歷時厚度記錄表(有基流)

(SB-1)		(SB-2)		(SB-3)	
x=7m 厚度(cm)	時間(s)	x=21m 厚度(cm)	時間(s)	x=34m 厚度(cm)	時間(s)
5.3	352.2	5.7	822.8	6.4	1004.6
5.4	356	5.5	826.7	6	1009.6
6	358.8	6.1	832.4	6	1015.7
5.5	361.5	5.9	836.6	6	1019.4
5.2	365.2	6	839.4	6.1	1024.3
5.5	369.7	6.1	843	6.2	1029
5.5	373.4	5.7	844.9	5.8	1034.3
5.3	377.9	6.2	845.7	6	1038.8
5.8	381	5.7	849.1	6.2	1040.2
5.2	386.9	6	854.7	6	1046.3
5.5	396.8	5.7	860.5	6.4	1052.7
5.6	400.2	6	864.2	6.4	1064.2
6	413.7	5.7	867.9	6.2	1066.8
5.2	420	6	873.1	6.2	1071.3
5.8	422.1	5.7	878.8	6.6	1074.6
5	425.9	5.8	887.7	6.6	1079.5
5.4	433.1	6.3	894.7	6.2	1083.6
5.5	437.5	5.7	896.3	6.4	1088.2
5.4	441.5	6	899.2	6.6	1089.8
5.3	444.2	5.7	904.7	6.8	1093.9
5.3	455.1	5.9	908.5	6.6	1096.2
5.5	471.9	6	912.6	6.6	1098.7
5.5	476	5.7	916.4	6.4	1100.9
5.3	480.7	6	920	6.6	1102.9
5.6	485.6	5.8	924.4	6.8	1107.4
5.5	491.2	6.1	928.1	7	1111.3
5.5	500.2	6.2	934.8	6.6	1114.8
5.2	504.2	6.3	938.1	6.8	1120.5
5.8	512.2	6	941.8	6.8	1123.4
5.2	515.7	5.9	948.5	6.6	1125
5.3	521.5	6.4	955.4	6.8	1126.8
5.3	527.4	6	963.8	7	1128
5.5	534	6.5	965.5	7	1130.9

表 4-3(5) 變量異重流歷時厚度記錄表(有基流)

(SB-1)		(SB-2)		(SB-3)	
x=7m 厚度(cm)	時間(s)	x=21m 厚度(cm)	時間(s)	x=34m 厚度(cm)	時間(s)
5.2	542.6	6	967.1	6.8	1134.4
5.2	548.7	6.7	970.9	7	1137.6
6	556.7	6.1	975.2	7.2	1146.5
5.5	560.2	6.2	976.6	7.6	1149.1
5.5	568.4	6.5	979.7	7.2	1151.7
5.5	576.8	6.3	981.9	7.4	1156.1
5.5	581.2	6.6	988.2	7.2	1158.5
5.5	593.4	6.8	989.9	7.4	1163.8
5.5	602	6.6	992.7	7	1166.1
5.3	607.9	6.2	995.6	7.2	1169.1
5.5	621.2	7	996.8	7.6	1173
5.3	638.8	6.7	1000.2	7.2	1176.4
5.5	647.1	6.8	1002.4	7.4	1179
5.3	659.2	7	1003.9	7.2	1182.2
5.6	676.3	6.9	1006.6	7.4	1184.4
6	685.2	7.2	1012.8	7	1188.1
5.2	692.2	6.6	1014.1	7.4	1190.2
5.5	696.6	7.1	1016.3	7.2	1192.9
5.5	702.8	6.7	1018	7	1198.6
5.5	712.4	7.2	1021	7.4	1202.3
5.5	720.4	7.4	1023.5	7	1204.2
5.6	727	7.3	1026.1	7.2	1213.1
5.6	736.8	7.5	1030.3	7	1217
5.5	741.6	7.3	1032.4	7	1224.7
5.5	749.1	7.2	1034	7	1227.7
5.5	752.4	6.9	1036.4	7.2	1230.8
5.5	762.3	7.1	1039.7	6.8	1235.4
5.7	779.9	6.7	1042.1	7	1248.9
5.7	779.9	7.2	1043.9	7	1255
5.5	783.6	7.3	1046.8	6.8	1257.6
6	787.8	7	1050.6	6.6	1264.7
6	795.9	7.5	1053.2	6.6	1272.9
6.3	802.5	7	1055.8	6.8	1279.4

表 4-3(6) 變量異重流歷時厚度記錄表(有基流)

(SB-1)		(SB-2)		(SB-3)	
x=7m 厚度(cm)	時間(s)	x=21m 厚度(cm)	時間(s)	x=34m 厚度(cm)	時間(s)
6.2	810.1	7.4	1063.8	6.4	1283.4
6	814.4	7.5	1067.9	6.4	1286.6
6.2	821	6.9	1077.2	6.8	1288
6.5	827.4	6.8	1083.8	6.6	1290
6.5	835.2	7.1	1089.4	6.4	1294.7
6.8	844.3	7	1094.7	6	1297.7
7	845.8	6.7	1099.3	6.2	1299.3
7	848.7	6.9	1104.3	6.2	1302.8
7	855.4	6.4	1106.6	6.4	1304.3
6.8	860.2	6.7	1108.9	6.4	1306.9
7.4	864.1	6.8	1117.3	6.2	1309.3
7	866.9	6.3	1122.5	6.4	1312.2
6.8	872.8	6	1125.6	6.4	1315.8
7.2	876.4	6.3	1127.2	6.2	1322.4
7	882.8	6.6	1130.8	6	1325.3
7	888.3	6.2	1133	6.4	1327.1
7.2	892.5	6.3	1134.5	6.2	1332
7	898.9	6.5	1139.7	6.4	1340.4
7.3	902.8	6.2	1146.2	6	1344.7
7	907.5	6.6	1148.5	6	1350.1
7	910.5	6	1149.7	6.2	1355.2
7	914.7	6.2	1155.9	6.2	1359.2
7	918.5	6.3	1159	6	1362.4
7	925.3	5.6	1161.8	6.2	1365.6
6.8	929.1	6.1	1162.9	6	1367.9
7	932.6	6	1166	6.2	1375.5
6.5	935.1	5.6	1171.3	6	1382.4
7	938.3	6	1173.1	5.8	1386.1
7	944.2	5.9	1176.9	6	1388.5
6.5	948.3	6.1	1181.7	6.2	1392.8
6	952.9	5.6	1185	6.4	1399.1
6	960.5	5.9	1187.5	6	1402.8
6.5	963.4	5.5	1191.9	5.8	1405.5

表 4-3(7) 變量異重流歷時厚度記錄表(有基流)

(SB-1)		(SB-2)		(SB-3)	
x=7m 厚度(cm)	時間(s)	x=21m 厚度(cm)	時間(s)	x=34m 厚度(cm)	時間(s)
5.8	969	6	1197.7	6.4	1409.8
6.4	971.4	5.6	1202.1	6	1413.3
6	975.9	5.7	1209.1	6	1418.8
6	979.5	5.9	1213.8	6.2	1426.3
6	984.4	5.5	1216.3	6	1438.2
6	989.6	5.8	1220		
6.2	994.8	5.7	1227.8		
6	999.3	5.3	1230.8		
5.8	1003	5.8	1232.3		
5.5	1006.9	5.7	1235.5		
5.5	1010.6	5.6	1238.7		
5.5	1016.9	5.8	1242.6		
5.5	1034.5	5.9	1247		
5.5	1038.6	5.4	1249.4		
5	1049.3	5.5	1253.6		
5.3	1065.8	5.7	1258.2		
5.3	1068.7	5.5	1261.1		
5.5	1075.1	5.3	1263		
5.3	1079.4	5.5	1267.2		
5.3	1085.2	5.8	1276.4		
5.3	1089.4	5.5	1279.7		
5	1093	5.4	1284.2		
5	1096.3	5.5	1286.6		
5.2	1103.6	5.3	1292.5		
5.4	1112.3	5.5	1294.5		
5.3	1120.9	5.5	1298.6		
5.3	1125.6	5.7	1314.2		
5.6	1140.2	5.5	1323.2		
5.3	1142.6	5.2	1326.4		
5.3	1146.6	5.5	1328.5		
5.4	1156.9	5.2	1338.3		
		5.3	1343.1		
		5.6	1348.7		

表 4-3(8) 變量異重流歷時厚度記錄表(有基流)

(SB-1)		(SB-2)		(SB-3)	
x=7m 厚度(cm)	時間(s)	x=21m 厚度(cm)	時間(s)	x=34m 厚度(cm)	時間(s)
		5.5	1350.8		
		5.7	1354.4		
		5.5	1358.2		
		5.8	1363.3		
		5.5	1365.2		

表 4-4(1-1) 變量異重流歷時厚度記錄表(無基流)

定量 $Q=276\text{ cm}^3/\text{s}$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。											
時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m
0	0	0	0	234	6	6	0	429	5.6	5.6	7.5
30	0	0	0	237	6	6	0	432	5.6	5.8	7
50	0	0	0	240	6	5.8	0	435	5.6	5.8	6
52	0	0	0	243	6	5.8	0	438	5.5	5.8	6
53	0	0	0	246	5.8	6	0	441	5.5	5.8	6
55	0	0	0	249	5.8	6	0	444	5.5	6	6.2
57	0	0	0	252	5.8	6	0	447	5.5	6	6.1
60	0	0	0	255	5.8	5.8	0	450	5.5	6	5.7
63	0	0	0	258	5.7	5.7	0	453	5.5	5.8	5.7
66	0	0	0	261	5.7	5.7	0	456	5.6	6	5.6
69	0	0	0	264	5.7	5.7	0	459	6	5.8	5.5
72	0	0	0	267	5.6	6	0	462	6	5.8	5.6
75	0	0	0	270	5.6	6	0	465	6	5.8	5.6
78	0	0	0	273	5.6	6.1	0	468	6	5.8	5.6
81	0	0	0	276	5.6	5.7	0	471	6	5.8	5.6
84	0	0	0	279	5.5	5.7	0	474	6	5.7	5.6
87	6	0	0	282	5.5	5.7	0	477	6	5.7	5.6
90	6	0	0	285	5.5	5.7	0	480	5.7	5.7	5.6
93	7	0	0	288	5.5	5.7	0	483	5.7	5.7	5.6
96	7.7	0	0	291	5.5	5.7	0	486	5.6	5.8	5.6
99	7.7	0	0	294	5.5	5.8	0	489	5.6	5.8	5.6

表 4-4(1-2) 變量異重流歷時厚度記錄表(無基流)

定量 $Q=276\text{ cm}^3/\text{s}$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。											
時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m
102	7.8	0	0	297	5.5	5.8	0	492	5.6	5.5	5.6
105	8	0	0	300	5.5	5.8	0	495	5.6	5.6	5.7
108	8.5	0	0	303	5.5	5.8	0	498	5.5	5.5	5.7
111	8.5	0	0	306	5.5	5.8	0	501	5.5	5.5	5.7
114	8	0	0	309	5.5	6	0	504	5.6	5.5	5.7
117	7	0	0	312	5.5	6.2	0	507	5.6	5.8	5.8
120	6.6	0	0	315	5.5	6.2	0	510	5.8	5.8	5.8
123	6.3	0	0	318	5.5	6	0	513	5.9	6	6
126	6.5	0	0	321	5.5	6	0	516	5.9	6	6
129	6.3	5	0	324	5.5	5.8	0	519	6.2	6	6
132	6	6.5	0	327	5.5	5.8	0	522	6.2	6	6
135	6	7	0	330	5.5	5.7	0	525	6.1	6	6
138	6	7.8	0	333	5.5	5.7	0	528	6.1	5.7	6
141	5.7	8.4	0	336	5.5	5.6	0	531	5.7	5.7	6
144	5.6	8.5	0	339	5.5	5.6	0	534	5.7	5.8	6
147	5.6	8.5	0	342	5.6	5.8	0	537	5.7	5.8	6
150	5.7	7.8	0	345	5.7	5.5	0	540	5.5	5.8	6.1
153	5.7	7.4	0	348	5.6	5.5	0	543	5.5	5.6	6.2
156	5.6	7	0	351	5.6	5.5	0	546	5.5	5.7	6.2
159	5.6	6.8	0	354	5.6	5.5	0	549	5.5	5.7	6.1
162	5.6	6.6	0	357	5.8	5.6	0	552	5.5	5.7	6
165	5.6	6.1	0	360	5.8	5.6	0	555	5.6	5.7	5.6
168	5.6	6	0	363	5.8	5.6	0	558	5.6	5.6	5.8
171	5.6	6	0	366	6	5.6	0	561	5.6	5.6	5.8
174	5.7	6	0	369	6	5.6	0	564	5.7	5.6	5.6
177	6	6	0	372	6	5.7	0	567	5.7	5.6	5.6
180	6	6	0	375	6	5.8	0	570	5.6	5.7	5.6
183	6	5.8	0	378	6	5.7	0	573	5.6	5.8	5.8
186	6	5.7	0	381	6	5.6	0	576	6	5.8	5.8
189	6	5.8	0	384	6	5.8	0	579	6	6	5.8
192	6	5.5	0	387	5.5	5.7	0	582	6	6	5.8
195	6	5.5	0	390	5.5	6	0	585	6	6	5.7

表 4-4(1-3) 變量異重流歷時厚度記錄表(無基流)

定量 $Q=276\text{ cm}^3/\text{s}$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。											
時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m
198	6	5.6	0	393	5.5	6	0	588	5.7	6	5.7
201	6	5.6	0	396	5.5	6	0	591	5.8	5.7	5.7
204	6	5.6	0	399	5.5	6	0	594	5.6	5.8	6
207	6	5.7	0	402	5.5	6	0	597	5.6	5.8	6
210	5.7	5.7	0	405	6	6	0	600	5.5	5.8	6
213	5.7	5.7	0	408	6	6	0				
216	5.6	5.7	0	411	6	6	6				
219	5.5	5.8	0	414	6	6	6.5				
222	6	5.8	0	417	6	5.6	8.3				
225	6	5.8	0	420	6	5.7	8.4				
228	6	6	0	423	5.7	5.6	8.4				
231	6	6	0	426	5.7	5.6	8				

表 4-4(2-1) 變量異重流歷時厚度記錄表(無基流)

漸變量 $T_u = 90\text{s}$ 、 $T_b = 60\text{s}$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。											
時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m
0	0	0	0	229	9.1	8.5	0	352	6.6	5.5	0
60	0	0	0	230	9.1	8.5	0	353	6.4	5.5	0
90	0	0	0	231	9.1	8.3	0	354	6.4	5.8	0
91	0	0	0	232	9	8.3	0	355	7	5.8	0
92	0	0	0	233	8.9	8.3	0	356	7	5.8	0
93	0	0	0	234	8.5	8.4	0	357	7	6.2	0
94	5.5	0	0	235	8.5	8.4	0	358	7	6.2	0
95	8	0	0	236	8	8.4	0	359	7	6	0
96	8	0	0	237	8	8.3	0	360	6.5	6	0
97	7.8	0	0	238	8	8.5	0	361	6.1	6	0
98	7.5	0	0	239	8.2	8.3	0	362	6.3	6	0
99	7.5	0	0	240	8.3	8.3	0	363	6.5	6	0
100	7	0	0	241	8.2	8.3	0	364	7	6.2	0
101	6	0	0	242	8.3	8.2	0	365	6.9	6.3	0

表 4-4(2-2) 變量異重流歷時厚度記錄表(無基流)

漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。											
時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m
102	6	0	0	243	8.2	8.1	0	366	6.3	6.5	0
103	6	0	0	244	8	8.1	0	367	6	6.5	0
104	6	0	0	245	8.2	8	0	368	6.3	6.5	0
105	6	0	0	246	8.1	8	0	369	6	6.5	0
106	6	0	0	247	8.1	8	0	370	7	6.5	0
107	6	0	0	248	8.2	8	0	371	6.8	6.4	0
108	6	0	0	249	8.2	7.9	0	372	5.8	6.3	0
109	6	0	0	250	8.3	7.9	0	373	6.3	6.3	0
110	6	0	0	251	8	7.9	0	374	7	6.3	0
111	6.5	0	0	252	7.8	8	0	375	6.8	6.3	0
112	6.5	0	0	253	7.7	8	0	376	6.8	6.2	0
113	6.5	0	0	254	7.5	8	0	377	6.3	6.2	0
114	6.6	0	0	255	7.8	7.9	0	378	6.5	6.1	0
115	6.5	0	0	256	8	7.9	0	379	6.5	6.1	0
116	6.6	0	0	257	8	7.9	0	380	6.5	6.1	0
117	6.8	0	0	258	8	7.9	0	381	6.4	6.2	0
118	6.8	0	0	259	8	7.8	0	382	6.8	6.2	0
119	6.8	0	0	260	8	7.8	0	383	6.8	6.2	0
120	7	0	0	261	7.8	7.8	0	384	7	6.1	0
121	7	7	0	262	8.1	7.8	0	385	6.5	6.1	0
122	7	9	0	263	7.9	7.7	0	386	6.5	6.1	0
123	7.1	12.3	0	264	7.8	7.7	0	387	7	6.1	0
124	7.2	12.3	0	265	8	7.7	0	388	6	6	0
125	7.5	12.3	0	266	8.1	7.7	0	389	6.2	6	0
126	7.6	11.5	0	267	8.1	7.5	0	390	6.4	6.5	0
127	7.7	11.5	0	268	8	7.5	0	391	6.2	6.5	0
128	8	10.5	0	269	8	7.5	0	392	5.8	6.5	0
129	8	10.5	0	270	8	7.4	0	393	6	6.4	0
130	7.8	10.5	0	271	8	7.1	0	394	6	6.4	0
131	8	10	0	272	7.8	7	0	395	6.1	6.4	0
132	8	10	0	273	7.8	7	0	396	6.3	6.5	0
133	7.8	9.5	0	274	7.8	6.8	0	397	5.8	6.5	0
134	8	9.5	0	275	7.6	6.5	0	398	6.3	6.4	0

表 4-4(2-3) 變量異重流歷時厚度記錄表(無基流)

漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。											
時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m
135	8	9.5	0	276	7.7	6.7	0	399	7	6.4	0
136	8	9.5	0	277	7.8	6.5	0	400	6.8	6.5	0
137	7.8	9.5	0	278	7.8	6.5	0	401	6.8	6.5	0
138	8	9.5	0	279	7.7	6.5	0	402	6.3	6.5	0
139	8	9.5	0	280	7.7	6.4	0	403	6.5	6.5	0
140	8	9.5	0	281	7.6	6.4	0	404	6.5	6.6	0
141	8	9.5	0	282	7.5	6.4	0	405	6.5	6.6	0
142	7.8	9.5	0	283	7.5	6.5	0	406	6.4	6.4	0
143	8	9.5	0	284	7.8	6.5	0	407	6.8	6.4	0
144	8	9.5	0	285	7.7	6.4	0	408	6.8	6.4	0
145	8.1	9.5	0	286	8.2	6.4	0	409	7	6.4	0
146	8.1	9.5	0	287	7.8	6.5	0	410	6.5	6.4	0
147	8.2	9.5	0	288	7.2	6.5	0	411	6.5	6.5	0
148	8.3	9.5	0	289	7.4	6.5	0	412	7	6.4	0
149	8.3	9.5	0	290	7.5	6.5	0	413	6.7	6.4	0
150	8.2	9.5	0	291	8	6.6	0	414	6.5	6.4	0
151	8.3	9.5	0	292	7.8	6.6	0	415	6.7	6.5	0
152	8.2	9.5	0	293	7.6	6.4	0	416	6.8	6.5	0
153	8.1	9.5	0	294	7	6.4	0	417	6.6	6.5	0
154	8.2	9.5	0	295	7.5	6.4	0	418	6.5	6.4	0
155	8.3	9.5	0	296	7.4	6.4	0	419	6.6	6.4	0
156	8.2	9.5	0	297	7.2	6.4	0	420	6.4	6.4	0
157	8.2	9.5	0	298	7.2	6.5	0	421	6.4	6.4	5
158	8.2	9.5	0	299	7.1	6.5	0	422	7	6.5	7
159	8.1	9.5	0	300	7	6.5	0	423	7	6.5	10.8
160	8.2	9.5	0	301	6.9	6.4	0	424	7	6.5	11
161	8.2	9.5	0	302	6.8	6.4	0	425	7	6.4	12
162	8.3	9.5	0	303	7	6.4	0	426	7	6.4	14.7
163	8.3	9.5	0	304	7.5	6.4	0	427	6.5	6.3	14.7
164	8.3	9.5	0	305	7	6.5	0	428	6.1	6.3	14.7
165	8.2	9.5	0	306	7	6.5	0	429	6.3	6.3	14.7
166	8.1	9.5	0	307	7	6.5	0	430	6.5	6.3	14.7
167	8.2	9.5	0	308	7	6.4	0	431	7	6.2	13

表 4-4(2-4) 變量異重流歷時厚度記錄表(無基流)

漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。

時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m
168	8.2	9.5	0	309	6.9	6.4	0	432	6.3	6.2	12
169	8.2	9.5	0	310	6.9	6.3	0	433	6.3	6.1	10
170	8.3	9.5	0	311	7	6.3	0	434	6.2	6.1	6.6
171	8.3	9.5	0	312	6.9	6.3	0	435	6.3	6.1	6.6
172	8.3	9.5	0	313	6.8	6.3	0	438	6	6.4	6.5
173	8.4	9.5	0	314	6.7	6.2	0	441	6.1	6.4	6.5
174	8.4	9.5	0	315	6.8	6.2	0	444	6.3	6.4	6.5
175	8.4	9.5	0	316	6.9	6.1	0	447	6.8	6.5	6.5
176	8.5	9.5	0	317	7	6.1	0	450	6.5	6.5	6.5
177	8.5	9.5	0	318	7	6.1	0	453	6	6.5	6.5
178	8.4	9.5	0	319	6.9	6.2	0	456	6.5	6.4	6.5
179	8.4	9.5	0	320	6.8	6.2	0	459	6.3	6.4	6.5
180	8.5	9.5	0	321	6.9	6.2	0	462	6	6.3	6.5
181	8.5	9.5	0	322	6.8	6.1	0	465	6.1	6.3	6.5
182	8.6	9.5	0	323	7	6.1	0	468	6.3	6.3	6.5
183	8.5	9.5	0	324	7	6.1	0	471	6.3	6.3	6.5
184	8.4	9.5	0	325	7	6.1	0	474	6.2	6.2	6.5
185	8.5	9.5	0	326	6.5	6	0	477	6.1	6.2	6.5
186	8.4	9.5	0	327	6.5	6	0	480	6.1	6.1	6.5
187	8.4	9.5	0	328	6.5	6	0	483	6	6.1	6.5
188	8.4	9.5	0	329	6.8	6.4	0	486	6.3	6.1	6.5
189	8.3	9.5	0	330	6.8	6.4	0	489	6	6.2	6.4
190	8.2	9.3	0	331	6.5	6.4	0	492	6	6.2	6.4
191	8.3	9.3	0	332	6.5	6.4	0	495	6	6.2	6.4
192	8.2	9.3	0	333	6.5	6.5	0	498	6.3	6.1	6.4
193	8.2	9.3	0	334	6.5	6.4	0	501	6.5	6.1	6.4
194	8.2	9.2	0	335	6.6	6.5	0	504	6.5	6.1	6.4
195	8.4	9.2	0	336	6.7	6.5	0	507	6.3	6.1	6.4
196	8.4	9.2	0	337	6.8	6	0	510	6.3	6	6.5
197	8.4	9.2	0	338	6.8	6	0	513	6.3	6	6.5
198	8.4	9.2	0	339	7	6	0	516	6	6.4	6.5
199	8.5	9.1	0	340	7	6	0	519	6.2	6.4	6.5
200	8.5	9.1	0	341	6.7	5.8	0	522	6.5	6.3	6.5

表 4-4(2-5) 變量異重流歷時厚度記錄表(無基流)

漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$ ，進水口 10cm 處水深 9.3cm，入流鹽水濃度 6.39g/l。											
時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m	時間 (s)	X=5m	X=7m	X=28m
201	8.5	9.1	0	342	6.5	5.8	0	525	6.1	6.3	6.5
202	8.5	9	0	343	6.6	5.5	0	528	6.3	6.3	6.5
221	8.5	8.5	0	344	6.6	5.5	0	531	6.5	6.3	6.5
222	8.6	8.5	0	345	6.5	5.5	0	534	6.1	6.3	6.5
223	8.6	8.4	0	346	6.7	5.5	0	537	6.5	6.3	6.5
224	9	8.5	0	347	6.5	5	0				
225	9	8.6	0	348	6.7	5	0				
226	9	8.5	0	349	6.8	5	0				
227	9	8.4	0	350	6.6	5	0				
228	9.1	8.5	0	351	6.5	5.5	0				

表 4-5(1) 變量異重流潛入點歷線記錄

漸變量 $T_u = 0s$ 、 $T_b = 60s$		漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$		漸變量 $T_u = 180s$ 、 $T_b = 60s$	
時間(s)	位置(cm)	時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0	0	0
3	0	5	0	183.4	0
6	10	10	0	183.4	10
9	30	15	0	185.1	20
12	50	20	0	189.6	30
15	50	25	0	194.4	40
18	70	30	0	198.9	50
21	90	35	0	204.7	60
24	100	40	0	208.2	70
27	110	45	0	209.8	80
30	110	50	0	212.3	90
33	115	55	0	213.8	100
36	115	60	0	217.4	110
39	115	65	0	228.1	130
42	115	70	0	253	110
45	115	75	0	257.8	100
48	110	80	0	266.4	90

表 4-5(2) 變量異重流潛入點歷線記錄

漸變量 $T_u = 0s$ 、 $T_b = 60s$		漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$		漸變量 $T_u = 180s$ 、 $T_b = 60s$	
時間(s)	位置(cm)	時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
51	100	85	0	275.5	80
54	100	90	10	281.2	70
57	90	95	30	290.5	60
60	90	100	40	306	50
63	85	105	60	327.5	40
66	75	110	80	334.5	30
69	70	115	80	376.4	20
72	65	120	100	472.8	10
75	60	125	110	643.4	10
78	60	130	120		
81	55	135	130		
84	50	140	130		
87	45	145	120		
90	40	150	110		
93	30	155	100		
96	30	160	90		
99	30	165	80		
102	30	170	70		
105	30	175	60		
108	30	180	50		
111	20	185	50		
114	20	190	50		
117	15	195	45		
120	15	200	40		
123	15	205	40		
126	15	210	40		
129	15	215	30		
132	15	220	30		
135	10	225	30		
138	10	230	30		
141	10	235	25		
144	10	240	25		
147	10	245	25		

表 4-5(3) 變量異重流潛入點歷線記錄

漸變量 $T_u = 0s$ 、 $T_b = 60s$		漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$		漸變量 $T_u = 180s$ 、 $T_b = 60s$	
時間(s)	位置(cm)	時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
150	10	250	25		
153	10	255	20		
156	10	260	20		
159	10	265	20		
162	10	270	15		
165	10	275	10		
168	10	280	10		
171	10	285	10		
174	10	290	10		
177	10	295	10		
180	10	300	10		
183	10	305	10		
186	10	310	10		
189	10	315	10		
192	10	320	10		
195	10	325	10		
198	10	330	10		
201	10	335	10		
204	10	340	10		
207	10	345	10		
210	10	350	10		
213	10	355	10		
216	10	360	10		
219	10	365	10		
222	10	370	10		
225	10	375	10		
228	10	380	10		
231	10	385	10		
234	10	390	10		
237	10	395	10		
240	10	400	10		
243	10	405	10		
246	10	410	10		

表 4-5(4) 變量異重流潛入點歷線記錄

漸變量 $T_u = 0s$ 、 $T_b = 60s$		漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$		漸變量 $T_u = 180s$ 、 $T_b = 60s$	
時間(s)	位置(cm)	時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
249	10	415	10		
252	10	420	10		
255	10	425	10		
258	10	430	10		
261	10	435	10		
264	10	440	10		
267	10	445	10		
270	10	450	10		
273	10	455	10		
276	10	460	10		
279	10	465	10		
282	10	470	10		
285	10	475	10		
288	10	480	10		
291	10	485	10		
294	10	490	10		
297	10	495	10		
300	10	500	10		
		505	10		
		510	10		
		515	10		
		520	10		
		525	10		
		530	10		
		535	10		
		540	10		
		545	10		
		550	10		
		555	10		
		560	10		
		565	10		
		570	10		
		575	10		

表 4-5(5) 變量異重流潛入點歷線記錄

漸變量 $T_u = 0s$ 、 $T_b = 60s$		漸變量 $T_u = 90s$ 、 $T_b = 60s$		漸變量 $T_u = 180s$ 、 $T_b = 60s$	
		580	10		
		585	10		
		590	10		
		595	10		
		600	10		

表 4-6(1) 不同入流量之頭速記錄

$Q = 276\text{cm}^3 / s$			$Q = 507\text{cm}^3 / s$			$Q = 913\text{cm}^3 / s$		
位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)	位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)	位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)
0.1	1.4	-	0.1	1.4	-	0.1	1	-
0.2	3.1	0.0588	0.2	2.6	0.0833	0.2	2.1	0.0909
0.3	4.9	0.0556	0.3	3.9	0.0769	0.3	2.9	0.1250
0.4	6.5	0.0625	0.4	5.3	0.0714	0.4	3.8	0.1111
0.5	8.1	0.0625	0.5	6.4	0.0909	0.5	4.5	0.1429
0.6	9.9	0.0556	0.6	7.7	0.0769	0.6	5.6	0.0909
0.7	11.6	0.0588	0.7	9.1	0.0714	0.7	6.6	0.1000
0.8	13.4	0.0556	0.8	10.4	0.0769	0.8	7.5	0.1111
0.9	15.3	0.0526	0.9	11.8	0.0714	0.9	8.4	0.1111
1	16.9	0.0625	1	13.2	0.0714	1	9.4	0.1000
1.1	18.7	0.0556	1.1	14.5	0.0769	1.1	10.3	0.1111
1.3	22.5	0.0526	1.3	17.2	0.0741	1.3	12.2	0.1053
1.4	24.2	0.0588	1.4	18.7	0.0667	1.4	13.2	0.1000
1.5	26.3	0.0476	1.5	20.2	0.0667	1.5	14.3	0.0909
1.6	28	0.0588	1.6	21.8	0.0625	1.6	15.4	0.0909
1.7	29.8	0.0556	1.7	23.2	0.0714	1.7	16.4	0.1000
1.8	31.5	0.0588	1.8	25	0.0556	1.8	17.5	0.0909
1.9	33.7	0.0455	1.9	26.6	0.0625	1.9	18.5	0.1000
2	35.6	0.0526	2	28.1	0.0667	2	19.6	0.0909
2.1	37.5	0.0526	2.1	29.7	0.0625	2.1	20.7	0.0909
2.2	39.4	0.0526	2.2	31.2	0.0667	2.2	21.8	0.0909
2.3	41.1	0.0588	2.3	32.9	0.0588	2.3	23	0.0833

表 4-6(2) 不同入流量之頭速記錄

Q = 276cm ³ /s			Q = 507cm ³ /s			Q = 913cm ³ /s		
位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)	位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)	位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)
2.5	47.1	0.0333	2.5	35.4	0.0800	2.5	25.1	0.0952
2.6	49.1	0.0500	2.6	36.7	0.0769	2.6	26.3	0.0833
2.7	50.8	0.0588	2.7	38.2	0.0667	2.7	27.5	0.0833
2.8	52.9	0.0476	2.8	39.9	0.0588	2.8	28.8	0.0769
2.9	54.8	0.0526	2.9	41.6	0.0588	2.9	30	0.0833
3	56.7	0.0526	3	43.6	0.0500	3	31.2	0.0833
3.1	58.6	0.0526	3.1	46	0.0417	3.1	32.2	0.1000
3.2	60.7	0.0476	3.2	48.3	0.0435	3.2	33.4	0.0833
3.3	62.2	0.0667	3.3	49.8	0.0667	3.3	34.7	0.0769
3.4	64.7	0.0400	3.4	51.5	0.0588	3.4	35.8	0.0909
3.5	66.5	0.0556	3.5	53.1	0.0625	3.5	37.1	0.0769
3.7	70.5	0.0500	3.7	56.2	0.0645	3.7	39.4	0.0870
3.8	72.7	0.0455	3.8	57.9	0.0588	3.8	40.5	0.0909
3.9	74.6	0.0526	3.9	59.5	0.0625	3.9	42	0.0667
4	76.5	0.0526	4	60.9	0.0714	4	43.9	0.0526
4.1	78.6	0.0476	4.1	62.6	0.0588	4.1	46.2	0.0435
4.2	80.5	0.0526	4.2	64.2	0.0625	4.2	48.1	0.0526
4.3	82.4	0.0526	4.3	65.8	0.0625	4.3	49.7	0.0625
4.4	84.4	0.0500	4.4	67.3	0.0667	4.4	50.9	0.0833
4.5	86.7	0.0435	4.5	69	0.0588	4.5	52.2	0.0769
4.6	89.4	0.0370	4.6	70.8	0.0556	4.6	53.7	0.0667
4.7	91.9	0.0400	4.7	72.8	0.0500	4.7	55	0.0769
4.9	95.4	0.0571	4.9	76.1	0.0606	4.9	57.4	0.0833
5	97.5	0.0476	5	77.8	0.0588	5	58.7	0.0769
5.1	99.4	0.0526	5.1	79.3	0.0667	5.1	60.1	0.0714
5.2	101.4	0.0500	5.2	81.1	0.0556	5.2	61.4	0.0769
5.3	103.4	0.0500	5.3	82.6	0.0667	5.3	62.8	0.0714
5.4	105.1	0.0588	5.4	84.2	0.0625	5.4	64.1	0.0769
5.5	107	0.0526	5.5	86.2	0.0500	5.5	65.4	0.0769
5.6	108.9	0.0526	5.6	87.8	0.0625	5.6	66.6	0.0833
5.7	110.8	0.0526	5.7	89.7	0.0526	5.7	67.9	0.0769
5.8	112.6	0.0556	5.8	92	0.0435	5.8	69.1	0.0833

表 4-6(3) 不同入流量之頭速記錄

Q = 276cm ³ /s			Q = 507cm ³ /s			Q = 913cm ³ /s		
位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)	位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)	位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)
5.9	114.6	0.0500	5.9	94	0.0500	5.9	70.4	0.0769
6	116.3	0.0588	6	95.5	0.0667	6	71.7	0.0769
6.1	118.4	0.0476	6.1	97.3	0.0556	6.1	73.3	0.0625
6.2	120.2	0.0556	6.2	98.9	0.0625	6.2	74.5	0.0833
6.3	122.1	0.0526	6.3	100.5	0.0625	6.3	75.8	0.0769
6.4	124	0.0526	6.4	102.2	0.0588	6.4	77.3	0.0667
6.5	125.7	0.0588	6.5	103.7	0.0667	6.5	78.6	0.0769
6.6	127.7	0.0500	6.6	105.4	0.0588	6.6	79.9	0.0769
6.7	129.9	0.0455	6.7	107	0.0625	6.7	81.2	0.0769
6.8	131.9	0.0500	6.8	108.7	0.0588	6.8	82.7	0.0667
6.9	134	0.0476	6.9	110.4	0.0588	6.9	84.2	0.0667
7	136	0.0500	7	112.1	0.0588	7	85.6	0.0714
7.1	138	0.0500	7.1	113.6	0.0667	7.1	87.1	0.0667
7.2	140	0.0500	7.2	115.4	0.0556	7.2	88.9	0.0556
7.3	141.8	0.0556	7.3	117.1	0.0588	7.3	90.6	0.0588
7.4	143.6	0.0556	7.4	118.6	0.0667	7.4	92.3	0.0588
7.5	145.5	0.0526	7.5	120.4	0.0556	7.5	93.9	0.0625
7.6	147.5	0.0500	7.6	122.1	0.0588	7.6	95.5	0.0625
7.7	149.2	0.0588	7.7	123.9	0.0556	7.7	97.1	0.0625
7.8	151.1	0.0526	7.8	125.7	0.0556	7.8	98.4	0.0769
7.9	153.2	0.0476	7.9	127.5	0.0556	7.9	99.8	0.0714
8	154.9	0.0588	8	129.4	0.0526	8	101.2	0.0714
8.1	156.8	0.0526	8.1	131.1	0.0588	8.1	102.7	0.0667
8.2	158.5	0.0588	8.2	133	0.0526	8.2	104	0.0769
8.3	160.6	0.0476	8.3	134.8	0.0556	8.3	105.4	0.0714
8.4	162.6	0.0500	8.4	136.5	0.0588	8.4	106.7	0.0769
8.5	164.2	0.0625	8.5	138.2	0.0588	8.5	107.9	0.0833
8.6	165.9	0.0588	8.6	139.9	0.0588	8.6	109.3	0.0714
8.7	167.8	0.0526	8.7	141.6	0.0588	8.7	110.8	0.0667
8.8	169.8	0.0500	8.8	143.2	0.0625	8.8	112.2	0.0714
8.9	171.5	0.0588	8.9	144.8	0.0625	8.9	113.8	0.0625
9	173.4	0.0526	9	146.4	0.0625	9	115.3	0.0667

表 4-6(4) 不同入流量之頭速記錄

Q = 276cm ³ /s			Q = 507cm ³ /s			Q = 913cm ³ /s		
位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)	位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)	位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)
9.1	175.1	0.0588	9.1	148	0.0625			
9.2	176.9	0.0556	9.2	149.6	0.0625			
9.3	178.9	0.0500	9.3	151.4	0.0556			
9.4	181	0.0476	9.4	153	0.0625			
9.5	182.7	0.0588	9.5	154.4	0.0714			
9.6	184.6	0.0526	9.6	156	0.0625			
9.7	186.2	0.0625	9.7	157.7	0.0588			
9.8	188.1	0.0526	9.8	159.2	0.0667			
9.9	190	0.0526	9.9	161	0.0556			
10	191.7	0.0588	10	162.6	0.0625			
10.1	193.6	0.0526	10.1	164.3	0.0588			
10.2	195.2	0.0625	10.2	165.9	0.0625			
10.3	197.2	0.0500	10.3	167.5	0.0625			
10.4	199	0.0556	10.4	169.1	0.0625			
10.5	200.9	0.0526	10.5	171	0.0526			
10.6	202.8	0.0526	10.6	172.6	0.0625			
10.7	204.5	0.0588	10.7	174.4	0.0556			
10.8	206.3	0.0556	10.8	176	0.0625			
10.9	208.2	0.0526	10.9	177.6	0.0625			
11	209.9	0.0588	11	179.3	0.0588			
11.1	211.8	0.0526	11.1	181.1	0.0556			
11.2	213.6	0.0556	11.2	182.8	0.0588			
11.3	215.3	0.0588	11.3	184.5	0.0588			
11.4	217.3	0.0500	11.4	186.1	0.0625			
11.5	219.1	0.0556	11.5	187.8	0.0588			
11.6	221.1	0.0500	11.6	189.3	0.0667			
11.7	223.1	0.0500	11.7	190.9	0.0625			
11.8	224.9	0.0556	11.8	192.4	0.0667			
11.9	226.5	0.0625	11.9	194	0.0625			
12	228.1	0.0625	12	195.7	0.0588			
12.1	230.2	0.0476	12.1	197.3	0.0625			
12.2	232.1	0.0526	12.2	199.2	0.0526			

表 4-6(5) 不同入流量之頭速記錄

Q = 276cm ³ /s			Q = 507cm ³ /s			Q = 913cm ³ /s		
位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)	位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)	位置 (m)	時間 (s)	速度 (m/s)
12.3	233.8	0.0588	12.3	200.9	0.0588			
12.4	235.5	0.0588	12.4	202.6	0.0588			
12.5	237.2	0.0588	12.5	204.1	0.0667			
12.6	239.1	0.0526	12.6	205.6	0.0667			
12.7	240.7	0.0625	12.7	207.1	0.0667			
12.8	242.6	0.0526	12.8	208.8	0.0588			
12.9	244.3	0.0588	12.9	210.5	0.0588			
13	246.3	0.0500	13	212.2	0.0588			
13.1	248.1	0.0556	13.1	213.9	0.0588			
13.2	250.1	0.0500	13.2	215.6	0.0588			
13.3	251.9	0.0556	13.3	217.1	0.0667			
13.4	253.4	0.0667	13.4	218.7	0.0625			
13.5	255.4	0.0500	13.5	220.4	0.0588			
13.6	257	0.0625	13.6	222	0.0625			
13.7	258.7	0.0588	13.7	223.7	0.0588			
13.8	260.4	0.0588	13.8	225.5	0.0556			
13.9	262.4	0.0500	13.9	227.1	0.0625			
14	264.1	0.0588	14	228.7	0.0625			
14.1	265.9	0.0556	14.1	230.3	0.0625			
14.2	267.8	0.0526	14.2	231.9	0.0625			
14.3	269.7	0.0526	14.3	233.6	0.0588			
14.4	271.6	0.0526	14.4	235.4	0.0556			