

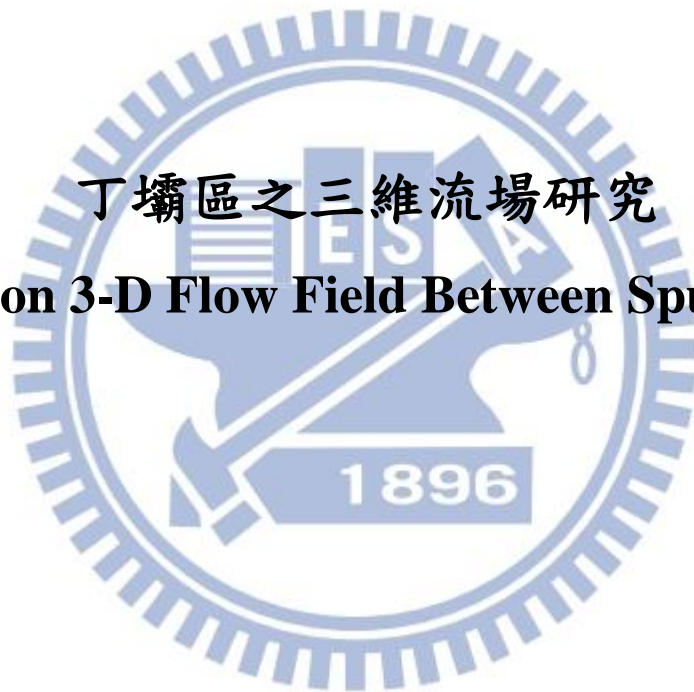
國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

丁壩區之三維流場研究

Study on 3-D Flow Field Between Spur Dikes



研究生：吳健賓

指導教授：葉克家 博士

中華民國一百零二年十月

丁壩區之三維流場研究

學生：吳健賓

指導教授：葉克家

國立交通大學土木工程學系

摘要

本研究使用三維計算流體力學軟體 FLUENT 模擬渠道內流經兩支丁壩之流況，藉由軟體模擬流場特性，了解三維流場分布及渦度分布情形。FLUENT 數模係採用有限體積法(finite volume method)離散控制方程式，以二階上風法離散對流項，由 SIMPLE 法耦合速度與壓力，使整個流場符合質量及動量守恆，再由多項流 K- ϵ 紊流配合流體體積法處理三維自由液面水流。

本研究中，網格主要由六面體及四面體網格組成之混合網格，總網格數約在 20 萬個，研究案例依照丁壩長度、丁壩間距與上游流量不同分做三組。經由模擬迴歸得到此三項變因與丁壩迴流長度及壩間流速之關係式，以供後續實驗模擬參考。由 FLUENT 模擬可以獲得實驗不易量測之局部細微流場。

關鍵字：FLUENT、三維流場、丁壩流場

Study on 3-D Flow Field Between Spur Dikes

Student: Jian-Bin Wu

Advisor: Keh-Chia Yeh

Institute of Civil Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

In this study, three-dimensional computational fluid hydrodynamics software, FLUENT, is adopted to simulate the flow passing through two groynes in a channel. By simulation, we find the flow characteristics and the distribution of three-dimensional flow pattern and vorticity in the spur-dike region. The model applies the finite volume discrete control equation, the second-order upwind scheme discretization advection term and the SIMPLE method coupled velocity and pressure to satisfy the mass conservation and momentum conservation. Also, the model uses the K- ϵ turbulent model and volume of fluid method to simulate the three-dimensional flow and its free surface, respectively.

Using mesh preprocessor, the model has a grid system composed of hexahedron and tetrahedron mixed meshes with total number of cells approximate 200 thousand are generated in this study.

The model simulates three cases with different conditions of groyne length, groyne spacing and inflow velocity. By regression, we obtain the relational formula between three variables and both vortex length and distribution of velocity around groyne. Using FLUENT model, we can obtain the local phenomenon that is difficult to measure.

Key word : FLUENT, 3-D flow field, flow field around spur-dike

誌謝

承蒙恩師 葉教授克家於就學期間悉心指導與諄諄教誨，使本論文得以順利完成。研究所兩年期間，恩師對於研究方法、分析問題、解決問題能力之培養，熱心指導讓學生受益良多。並於日常生活中，受到恩師與師母關心與照顧，僅此獻上最誠摯的感謝。文稿初成，承蒙國立海洋大學趙教授勝裕及國家高速網路與計算中心蔡副主任惠峰細心斧正與建議，使得本文更加完整，僅此獻上最誠摯之謝意。

研究所期間非常感謝廖博士仲達傾囊相授與指導，感謝仁凱學長、紹唐學長與彥瑜學姊在模擬過程中提點與協助，感謝機械所威翔學長在模式操作上指導。感謝昇學學長、東洲學長、岱玲學姊在學業及研究上的照顧。感謝想處這兩年的研究夥伴于軒、威辰、醇國、瑋廷、筱雯、蓉瑩，有了你們我的研究生活才能更豐富精采，這段回憶會永遠存在我心。感謝學弟高思、志鴻、鈞凱、大原、冠翰、庚翰、亮全、俊名、逸華的幫忙與參與，沒有你們的協助，我的研究不會如此順利。感謝中友九九的夥伴從大學開始一路相陪相伴，在研究瓶頸時給予鼓勵，使我有繼續做下去的動力。

最後，衷心感謝的是我的父母與弟妹，由於你們的扶持與栽培，使我得以在無後顧之憂的情況下完成我的學業。僅將此份榮耀與喜悅獻給關心我的家人、師長、同學及所有朋友們，謝謝你們。

吳健賓 謹銘於國立交通大學工程二館民國 102 年十月

目錄

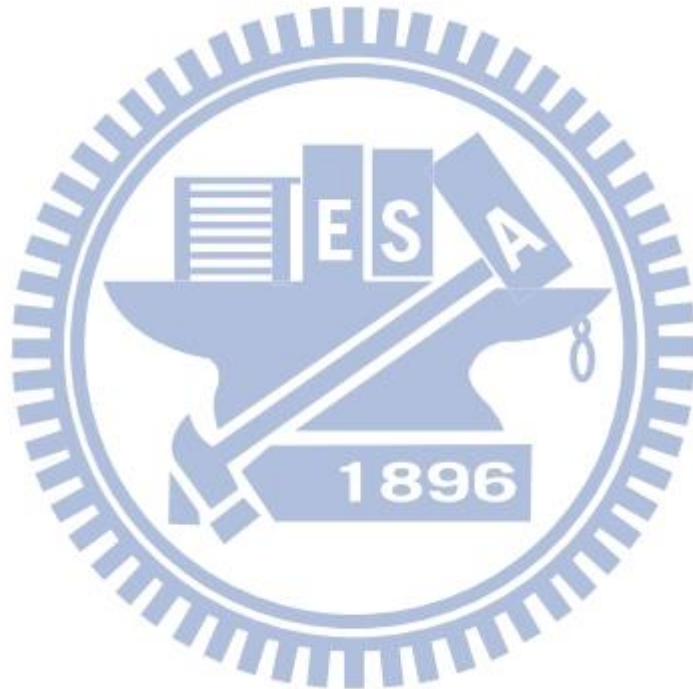
摘要	I
Abstract.....	II
誌謝	III
目錄	IV
表目錄	VI
圖目錄	VII
符號說明	IX
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 文獻回顧	2
1.2.1 丁壩之文獻回顧	2
1.2.2 三維模式之文獻回顧	5
1.3 研究目的	7
1.4 本文架構	8
第二章 數值模式與模式驗證	9
2.1 三維非穩態基本物理方程式	9
2.2 流體體積法	10
2.3 紊流流動近壁處理	11
2.4 數值方法介紹	13
2.5 數值模擬設定	15
2.6 實驗配置	21
2.7 實驗結果與驗證	23
第三章 數值模擬結果討論	30
3.1 模擬條件配置	30
3.1.1 因次分析	30
3.1.2 渦度	31
3.1.3 迴流長度	32
3.2 模擬渠道案例	32
3.2.1 壩長改變	35

3.2.2 間距改變	40
3.2.3 流量改變	45
3.3 模擬結果分析	49
第四章 結論與建議	55
4.1 結論	55
4.2 建議	56
參考文獻	57



表目錄

表 1-1	文獻統整表.....	4
表 2-1	模式紊流參數.....	27
表 3-1	案例總表.....	33
表 3-2	試驗結果表.....	48



圖目錄

圖 2-1	座標系統.....	9
圖 2-2	求解流程圖.....	13
圖 2-3	壓力基礎求解器流程圖.....	14
圖 2-4	初步網格圖.....	16
圖 2-5	邊界加密圖.....	17
圖 2-6	Skewness 分布圖.....	17
圖 2-7	求解流程圖.....	20
圖 2-8	Nawachuku 量測示意圖.....	23
圖 2-9	$y/L=1$ 流速比較.....	25
圖 2-10	$y/L=1.5$ 流速比較.....	25
圖 2-11	$y/L=3$ 流速比較.....	26
圖 2-12	$y/L=4$ 流速比較.....	26
圖 2-13	Tominaga 量測示意圖.....	27
圖 2-14	L1 流速比較.....	28
圖 2-15	L2 流速比較.....	28
圖 2-16	L3 流速比較.....	29
圖 2-17	L4 流速比較.....	29
圖 3-1	迴流長度圖.....	32

圖 3-2	壩長改變壩頂流速比較圖.....	36
圖 3-3	壩長改變渦度分布圖.....	37
圖 3-4	壩長改變流線分布圖.....	38
圖 3-5	間距改變壩頂流速比較圖.....	41
圖 3-6	間距改變渦度分布圖.....	42
圖 3-7	間距改變流線分布圖.....	43
圖 3-8	流量改變壩頂流速比較圖.....	45
圖 3-9	流量改變渦度分布圖.....	46
圖 3-10	流量改變流線分布圖.....	47
圖 3-11	不同壩長保護長度與壩頭流速關係圖.....	49
圖 3-12	不同壩長保護長度與壩頭渦度關係圖.....	50
圖 3-13	不同間距與保護長度關係圖.....	51
圖 3-14	不同間距與壩頭流速關係圖.....	51
圖 3-15	不同間距與壩頭渦度關係圖.....	52
圖 3-16	不同流量保護長度與壩頭流速關係圖.....	52
圖 3-17	不同流量保護長度與壩頭渦度關係圖.....	53

符號說明

B ：渠道寬度；

B_G ：丁壩寬度；

D ：丁壩間距；

F ：體積分率；

g ：重力加速度；

G_k ：紊流動能之產生項；

h ：上游水深；

H ：丁壩高度；

k ：紊流動能；

L ：丁壩長度；

L_p ：保護長度；

L_{vor} ：迴流長度；

p ：流場壓力；

t ：時間；

u ：X 方向速度分量；

v ：Y 方向速度分量；

V_{up} ：入流流速；

w ：Z 方向速度分量；



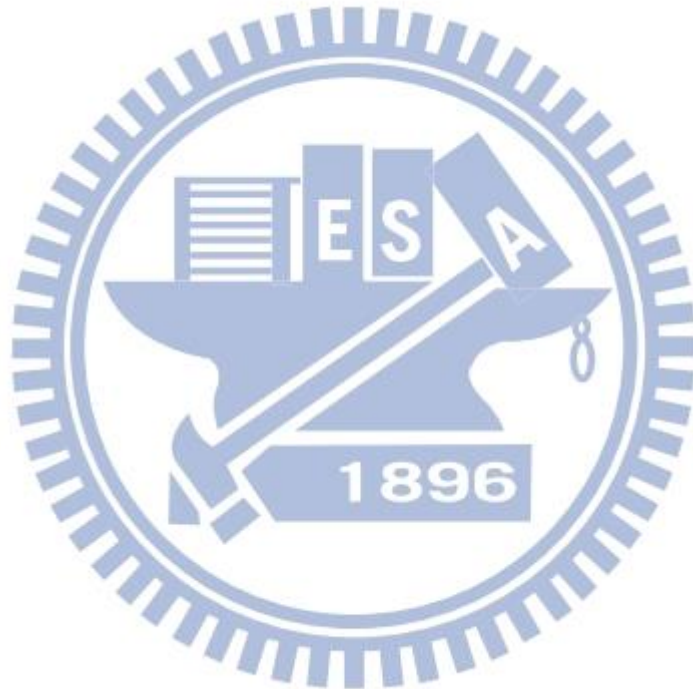
ρ : 流體密度 ;

μ : 動力黏滯係數 ;

ε : 紊流動能消散係數 ;

σ_k : k 方程式紊流 Prandtl 數 ;

ω : 渦度。



第一章 緒論

1.1 前言

丁壩工法為國內河川治理規劃常見之工程手段，具有防止岸壁淘刷、改變流路、挑流或護灘等功效。常見丁壩工法包括透水與不透水、浸沒與非浸沒、柔性與硬性等，而丁壩布置後之水理機制頗為複雜，值得加以研析其行為。本文以數值模式探討在不考慮其他外力(如：風、潮流、科氏力等)的影響下，設置兩支丁壩對流場造成之影響，以提供丁壩結構物設計及堤岸保護參考。

隨著科技的進步、電腦運算能力之提升，使用電腦來模擬真實流場之情況已是現今的趨勢。相較於傳統水工模型試驗費時、花費頗鉅且建造後修改不易之缺陷，數值模擬可針對實際需求反覆調整。所以，若能事先模擬預測則能減少設計不當，使設計更能符合所需。

由於水工構造物之周圍流場頗為複雜，使用一維或二維模式所得之結果不盡理想，所以本文使用計算流體力學 FLUENT 軟體模擬實驗室現有試驗渠道內架設丁壩之流場，藉由三維數值模型，探討不同流況下丁壩區域之流場情形。

1.2 文獻回顧

1.2.1 丁壩之文獻回顧

丁壩工法常用於挑流及防止岸壁沖刷，然而河中丁壩設置使得通水斷面減少，導致水流通過丁壩後產生局部加速以及壩後迴流效應，使得丁壩區域內流場劇烈變化，本文從水理角度探討丁壩區域內流場變化情形。

Chen and Li (1989)使用二維水深平均 $k-\varepsilon$ 紊流模型模擬丁壩流場，觀察丁壩周圍流速、紊流動能(turbulent kinetic)及消散速率(dissipation rate)分布。Tingsanchali and Maheswaran (1990)同樣使用二維水深平均模型模擬丁壩流場，更進一步觀察底床剪力分布，進行底床沖刷能力之評估。Molls et al. (1995)使用定值渦流黏滯度模型(constant eddy viscosity)模擬丁壩周圍流場，發現也可以得到與真實相近結果，不需使用其他更複雜的紊流模型來描述。Mayerle et al. (1995)採用三維靜水壓(static pressure)描述丁壩周圍流場行為並考慮側壁邊壁影響水流情況，發現不同紊流模式之影響不大。上述學者都假設河流呈靜水壓分布，推估丁壩周圍流場分布情形。

Zhou (2001)開發二維大渦模型(large eddy simulation model)模擬丁壩附近流速分布，模擬結果與實驗室案例相近。Ettema and Muste (2004)利用縮尺度模型模擬實驗室定床案例，與之比較探討模型率效應，發現在縮尺度模型下水流經過丁壩後，加速區域與迴流區域並未受到模型率影響其分布。Peng (2004)統整丁壩試驗研究與數值模擬結果，建立丁壩周圍流動三維模

型，對於丁壩流場與局部沖刷行為作整理介紹。Uijttewaal (2005)利用 1:40 縮尺度模型研究保持通水斷面不變的情況下，改變丁壩形狀等因子，觀察其附近紊流特性和局部沖刷效果，但由於此局部流場現象十分複雜，使用水深平均去推算在精度方面有待加強。

這些研究顯示紊流效應與真實情況接近且可藉由改變上游流況可使得局部沖刷最小化。但在潛沒式丁壩情況下，流況更為複雜且局部水理現象將更難以觀察，這些現象無法使用以往二維水深平均模型進行探討。

Tang et al. (2006)利用三維大渦模型模擬非潛沒式丁壩，分析壩後流場情形。MacCoy et al. (2008)利用大渦模型模擬丁壩在不同水流攻角下，其水深方向渦流分布情形。Yazdi et al. (2010)對於丁壩進行全三維紊流模擬，利用體積分率(volume of fluid)定義自由液面，觀察不同流況下底床剪應力情形。文獻統整結果如表 1-1 所示。

表 1-1 文獻統整表

作者	維度	觀察對象	成果
Chen & Li (1989)	2D	流速、紊流動能、消散 速率	丁壩周圍區域模擬成果與實驗差異頗大
Tingsanchali & Maheswaran (1990)	2D	底床剪力	藉由剪力分佈探討底床沖刷分佈情形
Molls et al. (1995)	2D	渦流、黏滯力	使用定值黏滯度模擬結果與真實相符
Mayerle et al. (1995)	3D	側向岸壁受力	在不同紊流模組下對側向岸壁影響不大
Zhou (2001)	2D	流速	大渦模型與實驗相符
Ettema & Muste (2004)	物模	模型率	模型率並未改變流場分佈情形
Peng (2004)	3D	局部沖刷	統整實驗與數模成果提出三維模式模型
Uijtewaal (2005)	物模	紊流特性、局部沖刷	利用水深平均推算成果不佳
Tang et al. (2006)	3D	流速分佈	與實驗相符合
MacCoy et al. (2008)	3D	垂向渦流分佈	壩後垂向底部會有渦流產生
Yazdi et al. (2010)	3D	底床剪應力	藉由剪力分佈了解底床沖刷分佈情形

在實際應用上，丁壩極少以單座形式應用於河道中，也鮮少有人探討丁壩間之交互作用。本研究利用全三維紊流模式模擬兩支潛沒式丁壩在不同流況下之流場，並針對區間內渦度做進一步的探討。

1.2.2 三維模式之文獻回顧

本研究比較國內外常用計算流體力學(CFD)軟體，包括 CFX、FLUENT、Flow-3D 等，而 CFX 與 FLUENT 分別於 2003 與 2006 被 ANSYS 收購，更名為 ANSYS CFX 跟 ANSYS FLUENT，在收購後兩模式仍有區別，所以於此將兩者分開討論。各模式大多經過長久的開發與發展，基本運算及功能性方面沒有相差太多，於此列出主要特點，分別概述如下：

1、ANSYS CFX

CFX 是由英國 AEA 公司所開發計算流體力學軟體，其強大的圖形介面功能可節省傳統 CFD 計算條件設定時間，搭配新的外型與網格建立模組 ICEM CFD，可快速建立複雜之幾何外型並產生計算網格，具不相稱網格交界面處理能力，可計算具有紊流、燃燒與輻射、二相流、自由液面等特徵之流場。數值方法方面，和大多數 CFD 軟體不同點在於 CFX 採用了基於有限元素的有限體積法，在有限體積法的守恆特性基礎上，吸收了有限元素法的數值精確性，相對於單純有限體積法對六面體採用 6 點內插，在網格上採用 24 點內插；而相較於單純有限體積法對四面體網格採用 4 點內插，在網格上採用 60 點內插。

從水理角度方面來說，模式包含了大多數紊流模組，從基本的 $k-\epsilon$ 、

k- ω 、SST (Shear stress transport) 模型跟大渦模型等，都已在模式中提供使用者參考選用。

2、ANSYS FLUENT

FLUENT 是美國 FLUENT 公司所發展的三維計算流體力學軟體，此軟體已廣泛地被用在空氣動力學、工業工程及建築通風設計、多相流場等。其靈活的非結構網格以及根據求得的解自動細化或粗化網格技術，可讓解獲得更好的精度並提高程式運算效率。在邊界的設定方面，可讓使用者定義多種邊界條件，如上游及下流速或壓力邊界、壁面邊界條件等，並可採用卡式座標和圓柱座標系分量方式輸入進口條件。在模式運算方面可進行平行處理，大幅提高運算效率，改善以往三維模式需要長時間運算的缺點，讓使用者可以在最短的時間中得到最佳的結果。

水理方面，同 CFX 一樣將所有常見的紊流模式都包含其中供使用者來選用，這方面的功能因為都經過多位學者專家研究與改善，並沒有多大差異。

3、FLOW-3D

FLOW-3D 特點在模擬具有自由液面流場模擬分析，以卡氏座標網格模擬簡化計算，避免使用者花費過多時間處理網格製作。FLOW-3D 在操作設定上非常簡便，網格製作使用卡氏座標網格，在結構複雜處可新增一結構區域細化網格以增加精度。不同於 CFX 跟 FLUENT 兩個模式選用有限體積法來求解，FLOW-3D 採用有限差分法來求解，至於水理方面，不同於前面

兩個模式(CFX、 FLUENT)，在紊流模組方面只提供了 $k-\varepsilon$ 跟大渦模型來供選擇。

上述三套 CFD 軟體主要差異在於數值離散方法，FLUENT 為有限體積法，CFX 為基於有限元素法改良之有限體積法，而 FLOW-3D 則是有限差分法。此三種離散方法特性，有限元素的概念是最小誤差法，必須求解矩陣，在計算上需消耗較多運算資源；有限差分法基於結構性網格，無法處理過於複雜的幾何邊界；而有限體積法之計算效率優於有限元素法，且其適用於結構與非結構性網格，能處理複雜邊界問題。因此從效率與應用面，本研究選擇 Fluent 模擬與分析丁壩流場問題。

Fluent 能夠根據計算結果調整網格，此自動調適網格能力對於高精度需求與有較大梯度流場處可局部加密網格。由於此功能只有在需要加密流動區域實施而非全流場，因此可節省計算時間。平行運算功能需要額外授權且須使用更高階硬體來配合，在本文中並未使用此功能來運算。

1.3 研究目的

在工程應用上，丁壩屬常見之水工結構物，但丁壩附近流場是一紊亂三維流場，過去做過許多研究僅著眼於單一丁壩周圍流場行為，鮮少討論到複數丁壩間交互作用情形。因此，本研究將利用三維模式 FLUENT 進行數值模擬，分析丁壩區間內流速與渦度，並探討在不同流況、丁壩長度、丁壩間距下流速與渦度分布之關係。

1.4 本文架構

本研究主要以數值模擬，探討丁壩區域內流場特性及改變流況、丁壩長度、丁壩間距對流場影響。本文架構共分五章節，其中第二章介紹數值模式及本研究案例驗證，第三章介紹模擬所使用之相關設定，第四章則針對模擬結果探討丁壩周邊區域內流場特性，最後一章總結，茲就論文章節大綱說明如下：

第一章 緒論

說明研究動機、目的、文獻回顧及本文架構。

第二章 數值模式與模式驗證

說明本研究所使用之基本物理方程式，在模式驗證方面採用與過往文獻驗證模擬在相同條件下之渠道流速分布，以證明模式適用性。

第三章 數值模擬結果討論

利用 FLUENT 計算流體力學軟體之標準 $k-\varepsilon$ 模式模擬丁壩區域三維流場，並觀察在不同的流況、丁壩長度、丁壩間距下流速與渦度分布之關係。

第四章 結論與建議

綜合數值模擬分析結果做出簡要之結論，並對往後之研究提出建議。

第二章 數值模式與模式驗證

2.1 三維非穩態基本物理方程式

本研究採用直角坐標系，如圖 2-1 所示，由於本研究模擬為非穩態流場，在瞬時 N-S 方程中把變量放入連續及動量方程取其時間平均，如式(2-1)之式(2-4)所示。

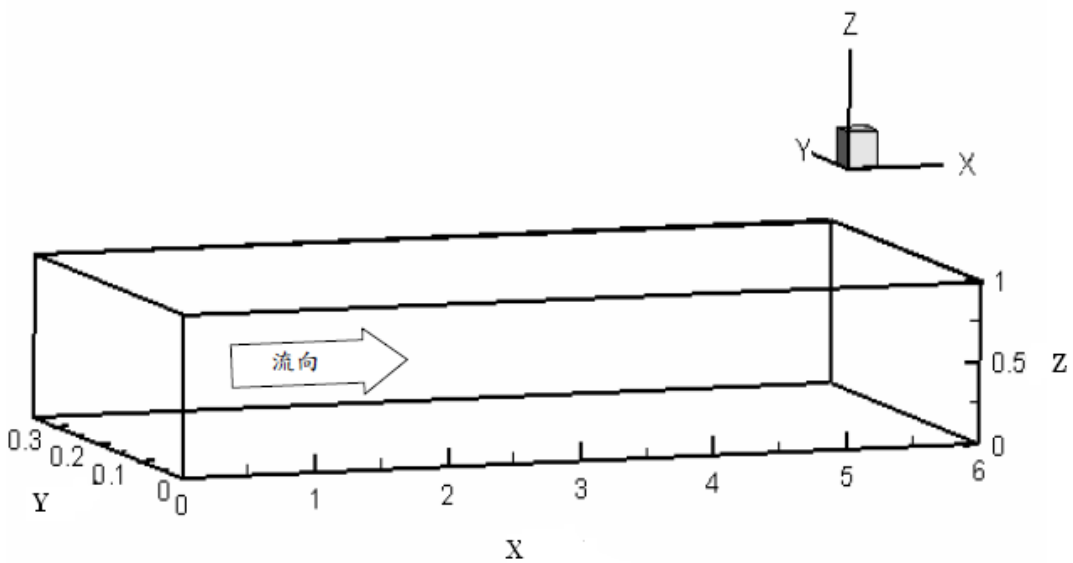


圖 2-1 座標系統

(1) 連續方程式(continuity equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \dots\dots\dots (2-1)$$

(2) 動量方程式(momentum equation)

(i) x 方向之動量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \dots\dots\dots (2-2)$$

(ii) y 方向之動量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \dots\dots\dots (2-3)$$

(iii) z 方向之動量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \dots\dots\dots (2-4)$$

(3) 紊流動能 k 方程式

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uk) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vk) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wk) = G_k - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (2-5)$$

(4) 紊流動能消散率 ϵ 方程式

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \epsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \epsilon) = \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (2-6)$$

$$G_k = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (2-7)$$

式中， u 、 v 、 w 分別為 x 、 y 、 z 方向速度(velocity)； p 為流場壓力(pressure)； ρ 為流體密度(density)； μ 為動力黏滯係數(viscosity)； k 為紊流動能(turbulent kinetic energy)； ϵ 為紊流動能消散係數(turbulent dissipation rate)； σ_k 為 k 方程式紊流 Prandtl 數； σ_ϵ 為 ϵ 方程式紊流 Prandtl 數； G_k 表示紊流動能之產生項(production of turbulence energy)； $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 為常數。

2.2 流體體積法

三維丁壩流場分析模擬包含自由液面的計算，因此必須同時計算空氣與水的流場，在本研究中，配合流體體積法(volume of fluid method)求解那維爾-史托克方程式(Navier-Stokes)，模擬自由液面流場。空氣與水的流體控制方程式形式相同，只須各別代入兩者的物理性質於控制方程式中，而空

氣與水的物理性質則透過體積分率(volume fraction)來定義(Hirt & Nichols, 1981)。

在控制體積內，水的體積分率定義如下：

$$F = \frac{\delta\Omega_{water}}{\delta\Omega_{cell}} \dots\dots\dots (2-8)$$

式(2-8)中， Ω_{cell} 為控制體積大小； Ω_{water} 為控制體積內水的體積。當 $F = 1$ 時，控制體積內皆為水；當 $F = 0$ 時，控制體積內充滿空氣；當 $0 < F < 1$ 時，則代表控制體積內包含自由液面。

空氣與水的控制方程式形式相同，但兩者的物理性質則必須透過體積分率來定義：

$$\rho = F\rho_{water} + (1-F)\rho_{air} \dots\dots\dots (2-9)$$

$$\mu = F\mu_{water} + (1-F)\mu_{air} \dots\dots\dots (2-10)$$

根據質量守恆定律，在計算域內的空氣與水皆須符合連續方程式，水之體積分率連續方程式如下：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (2-11)$$

式(2-11)中， F 為控制體積內水所佔的體積分率； t 為時間； u_i 為 x_i 方向之速度，在計算域中，各別流體之所有物理量包括紊流動能(k)與動能消散率(ϵ)，則透過其容積比率計算得知。

2.3 紊流流動近壁處理

紊流流動受壁面影響甚鉅，在靠近壁面處黏滯力將抑制流體切線方向

速度變化，而且流體運動受壁面阻礙而抑制了正常的波動。近壁面區域可以分成三層區域，最近壁面層稱為黏滯次層(viscous sublayer)，在此區域內黏滯力在動量、熱量和質量交換中都佔有極重要位置；外區域稱為完全紊流層；在完全紊流層與黏滯次層間稱為混合區域(blending region)。FLUENT 中模式為使壁面邊界層處流動有良好表現，發展出「壁面方程(wall function)」與「近壁面模型(near-wall model)」兩種方法為近壁區域建模。

壁面方程使用半經驗公式來修正紊流模型，以解決壁面存在對紊流的影響；近壁面模型則使用網格的劃分來解決。在實際應用上，FLUENT 同時提供了以上兩種方法，在高雷諾數下欲觀察紊流受邊壁的影響，則在壁面需使用較密的網格。

本模擬使用 FLUENT 中的增強壁面處理，增強壁面處理是一種近壁面模型方法，藉由增強壁面函數結合了一個雙層模型。當採用雙層模型時，網格衡量參數是 y^+ ，並非 y^* 。最理想的網格劃分為第一網格在 $y^+ = 1$ 位置，理想的網格劃分需要在黏性影響區域內($Re < 200$)至少有十個網格，以便可以計算黏性區域內的平均速度和紊流量。 y^+ 定義如下：

$$y^+ \equiv \min \|\vec{r} - \vec{r}_w\| \dots\dots\dots (2-12)$$

式(2-12)中， \vec{r} 為點在流場中之位置向量； \vec{r}_w 為邊界之位置向量； Γ_w 為所有壁面邊界集合。

2.4 數值方法介紹

模式基本控制方程式離散採用有限體積法，並搭配流體體積法模擬自由液面，流體體積法可以同時求解空氣與水之流場，整體求解流程圖如圖 2-2 所示：

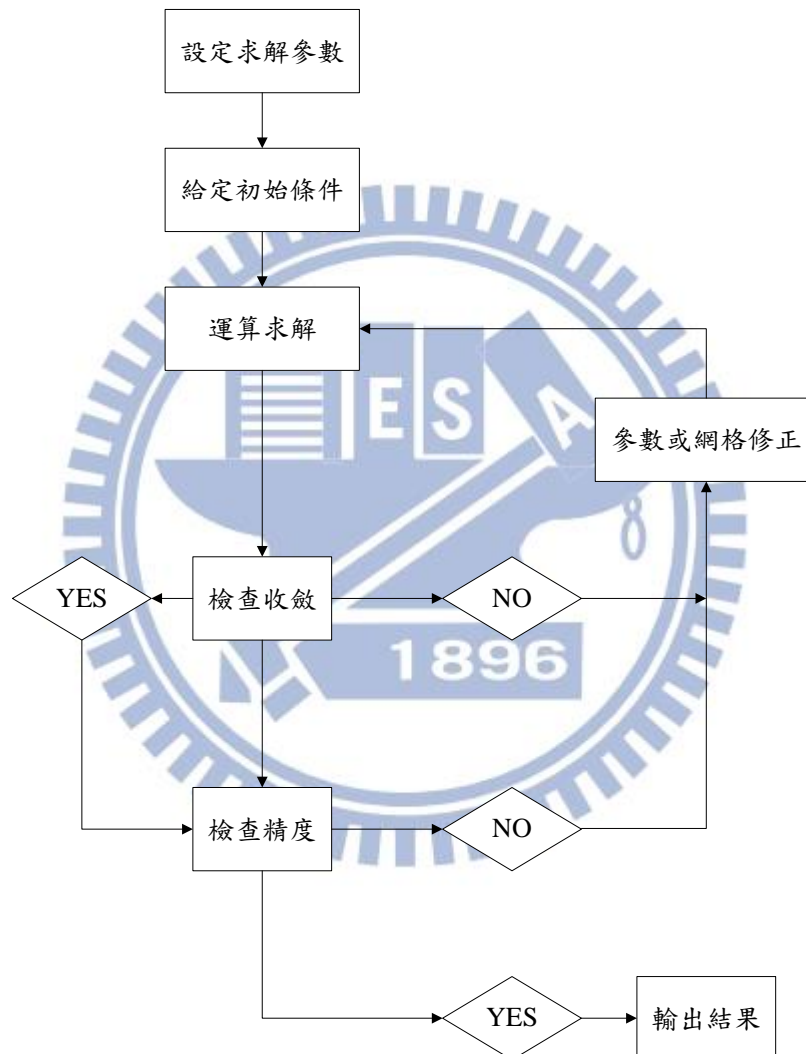


圖 2-2 求解流程圖

模式提供兩種求解器，分別是壓力基礎(pressure-based)求解器及密度基礎(density-based)求解器，壓力基礎求解器是以動量和壓力為基本變量，經連續方程式導出壓力和速度耦合計算，適用於一般多項流體；密度基礎

求解器是以向量方式求解連續方程式、動量方程式和能量方程式，主要適用於涉及密度變化、能量交換等高耦合現象，由於本研究模擬只牽涉到水流與空氣，而其密度也保持不變下，所以選用壓力基礎求解器作為求解工具，壓力基礎求解器求解流程如圖 2-3 所示：

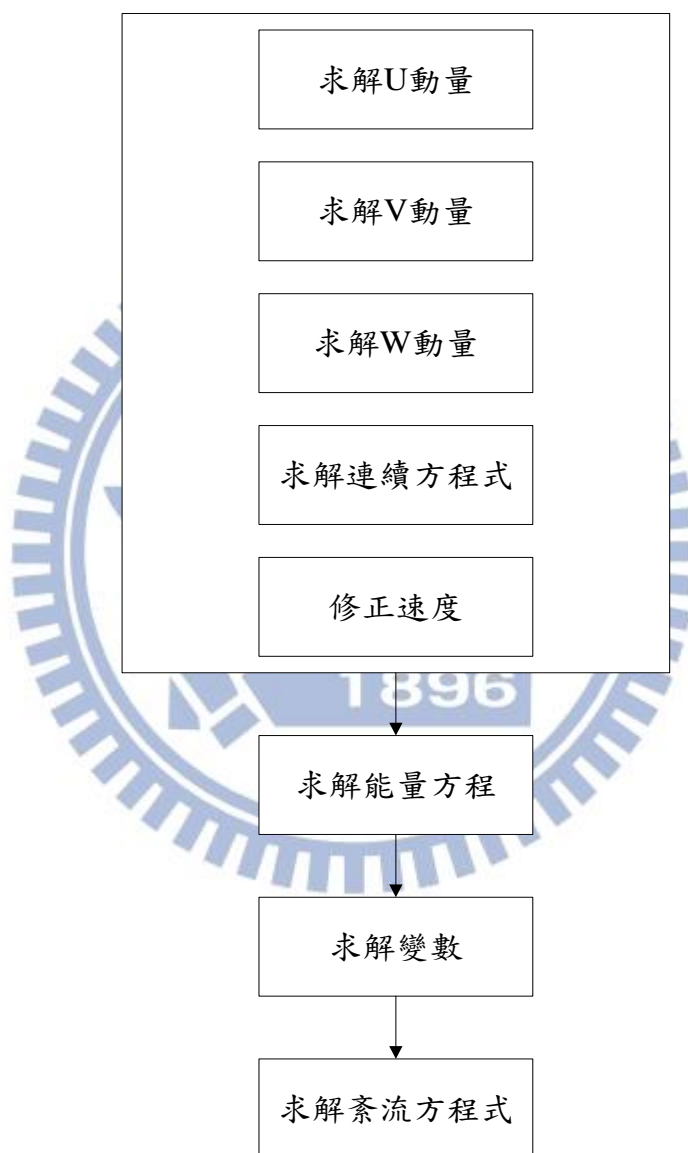


圖 2-3 壓力基礎求解器流程圖

在對流項方面二階上風法離散，擴散項採用格林高斯法單元 (Green-Gauss cell-based)離散，耦合求解方式選用 SIMPLE 法(semi-implicit

method for pressure-linked equation), 透過求解連續方程式與動量方程式導出壓力項, 再代入連續方程式求得殘差值, 再修正速度場與壓力場, 經反覆疊代直到達到收斂與精度標準。

2.5 數值模擬設定

一、數值模擬架構

本研究採用流體力學套裝軟體 FLUENT 進行模擬, 數值模擬主要分為三個架構: (1) Geometry 與 mesh 為前處理部分, 用來設計物理模型、網格建立邊界條件設定等; (2) FLUENT 為核心處理部分, 為模式運算核心, 進行模擬分析運算; (3) CFD-Post 為後處理部分, 將結果以數據或圖表方式輸出等。

FLUENT 架構的控制方程式除了基本連續方程式、動量方程式、能量方程式、濃度方程式外, 有很多物理及數學模式可供選擇, 用以計算不同流場問題。由於模擬非穩態流(unsteady)流場, 求解瞬時流場, 因此必須考慮數值的收斂性設定良好時間間距(time step, Δt)。

二、收斂條件

本研究在執行電腦模擬時考慮(1) 格網點的多寡及間距均勻性與非均勻性; (2) 各項數值運算其值前後誤差小於 10^{-5} 為止; (3) 在疊代過程中, 為了避免數值變化產生發散或增加其收斂性, 須調整其鬆弛因子(relaxation factor)使其低於預設值。根據模擬網格模型不同, 每個計算時間間距(Δt)

為 0.01 秒或更小以確保模式穩定。本研究在上下游流量誤差低於 1% 即認為已到收斂需求。

三、網格設計

理想的網格設計應依照流場特性及電腦運算效能來適當選用網格大小，一般而言，流場變化較大或欲觀察的範圍須加密網格，反之，則選用較大網格，如此才能兼顧計算解析度和計算效率。因此，在網格的設計上僅就研究之主要區域進行局部加密，並調整網格大小使網格尺度變化平緩，以避免網格體積突增或突減而產生數值不穩定。

本文在繪製完渠道模型後，首先對模型打上格網如圖 2-4 所示，由於為了加強底床部分模擬的精確性，在底床的位置上特別加密在丁壩周圍再做局部細化網格如圖 2-5 所示。

最後利用歪斜度(skewness)大小來判斷網格品質好壞，如果網格品質太差則進行修正補強，歪斜度越大表示網格扭曲程度較強烈，在計算品質上較容易出問題，大於 0.95 模式會無法計算使用，所以要確認是否在 0.95 以下，網格品質分布如圖 2-6 所示，慢慢修正將網格修至 0.90 以下。

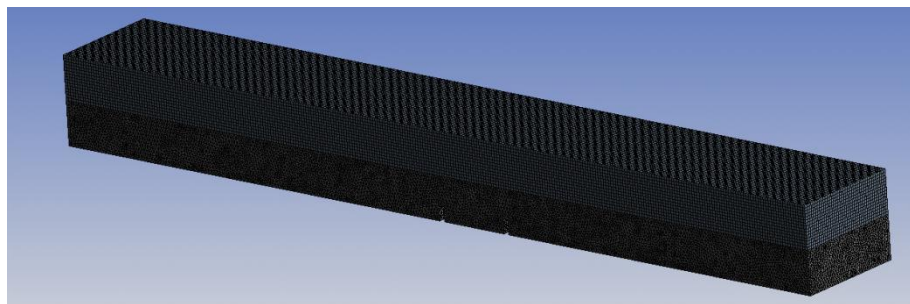


圖 2-4 初步網格圖

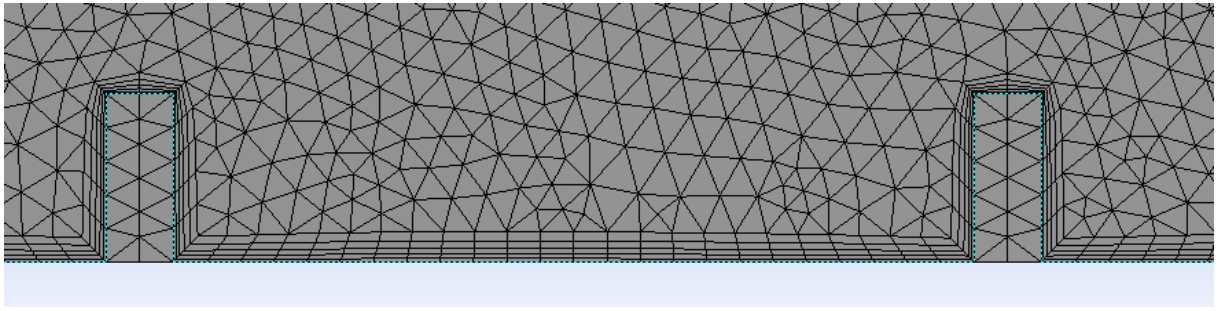


圖 2-5 邊界加密圖

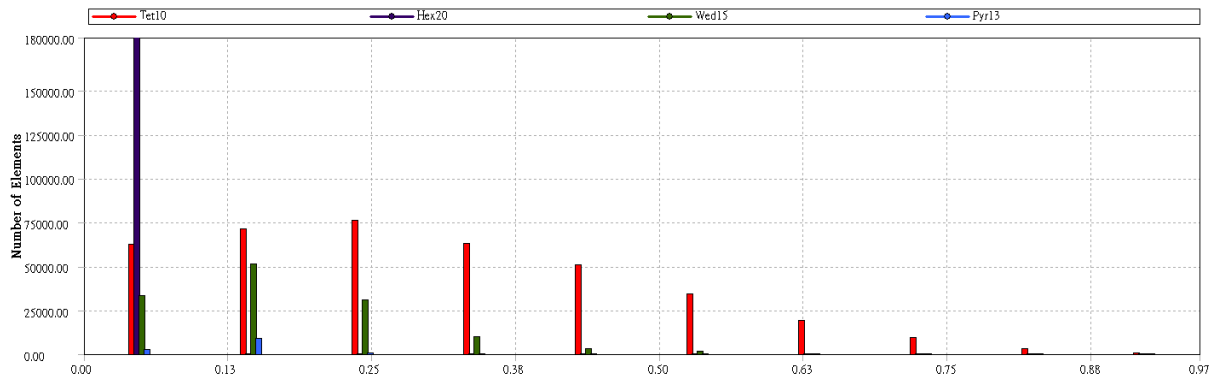


圖 2-6 skewness 分布圖

四、邊界條件設定

在計算流場時，所有邊界均須給定邊界條件，在本研究中渠道水流由左至右流動，分別指定空氣與水兩個單獨速度進口，由於自由液面會隨時間變動，所以空氣層的部分讓液面可以上下變動。另一方面為了避免上層空氣產生回流產生不穩定，所以空氣進口速度與水的進口速度相同。在計算上為了避免空氣產生的剪應力影響模式運算，上部邊界設定為對稱 (symmetry) 邊界，其物理意義為此邊界上法線速度分量及變數之梯度均為零，而下游出口採用自由出流，並不另外設定出口水與空氣比例，由模式循序運算，而其他固體邊界則採用不可滑動邊界(no-slip)條件。

五、自由液面設定

本研究模擬包含水與空氣，因此採用多相流模式，但上部空氣層厚度對於整體流場有頗大之影響，所以在設定入流時須將空氣層深度設定大到足以避免上部邊界壓力效應的產生，如空氣層厚度太小，會使得水流區域受到上部邊界壓力壓迫使得自由液面模擬產生誤差，根據 Tarek et al. (2004) 之研究，當起始深度比在 $1/3$ 或者更大時，上部邊界效應就可不計。因此，本研究在起始深度設定比為 1 ，以防止上部邊界效應影響。

六、數值模擬設定流程

1、前處理部分

- (1) Geometry 繪製模型。
- (2) mesh 產生網格。
- (3) 設定邊界條件。
- (4) 輸出三維網格資料。

2、FLUENT 部分

- (1) 讀入網格。
- (2) 設置重力加速度，方向為負 Z 方向，並設置空氣密度為工作流密度於初始水面上。
- (3) 選擇 VOF 模組並指定兩相流。
- (4) 設定水與空氣的流體材料性質。

- (5) 定義多項紊流模型 $k-\varepsilon$ 並選擇近壁面模型增強壁面處理。
- (6) 指定邊界條件，如第五點所述設置。
- (7) 設定求解參數，鬆弛因子採用模式建議範圍 0.2 ~ 0.5 調整。
- (8) 設定初始條件。
- (9) 計算求解。

3、後處理部分

- (1) CFD-Post 讀取計算結果。
- (2) 結果後處理。

模擬之流程如圖 2-7 所示。



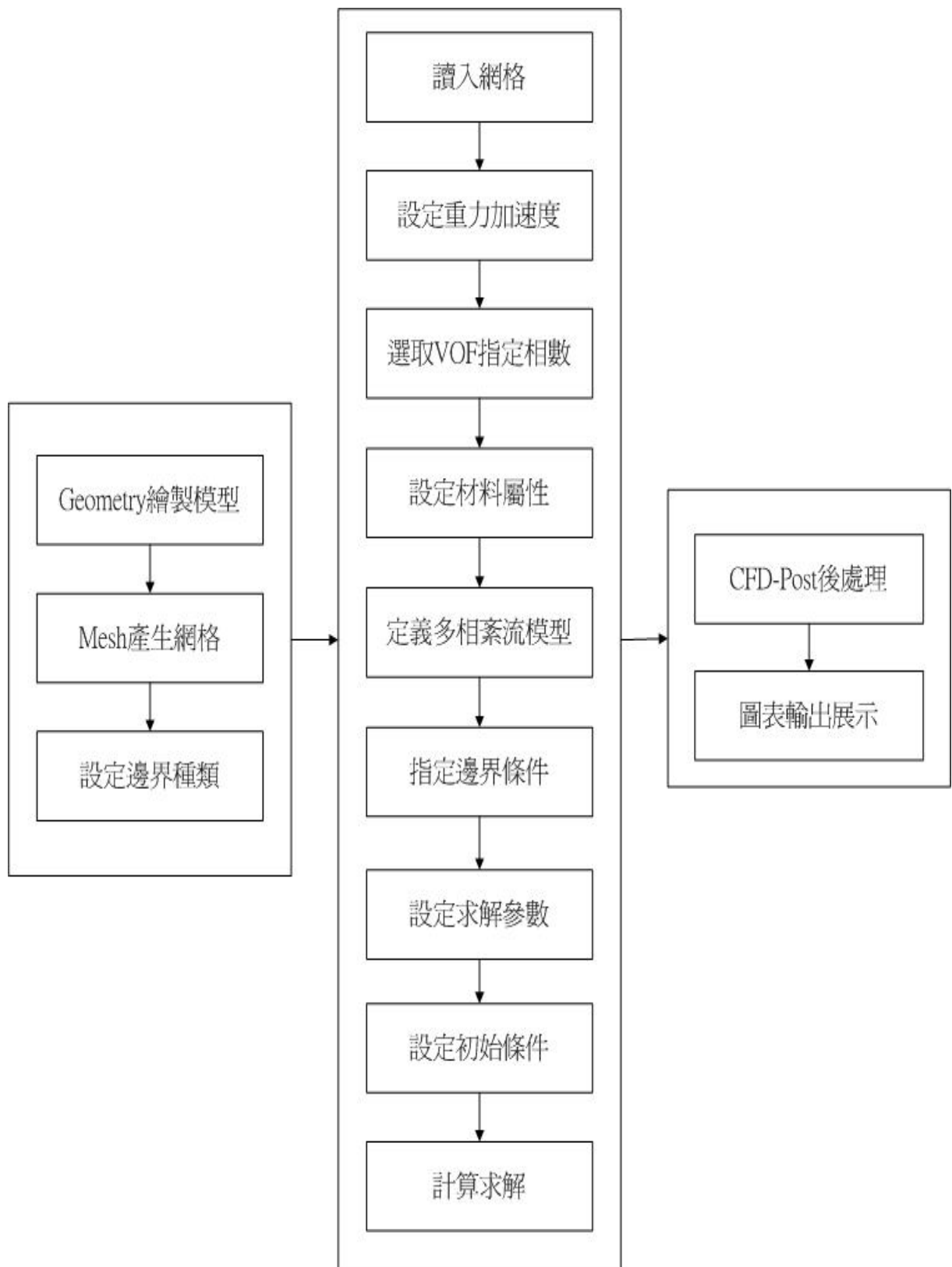


圖 2-7 求解流程圖

2.6 實驗配置

為了檢定 FLUENT 在長直渠道之水理參數，選用 Nawachuku (1979)與 Tominaga et al. (1996)兩實驗室案例之結果來檢定，以下是兩實驗案例實驗配置情形：

(1) Nawachuku (1979)

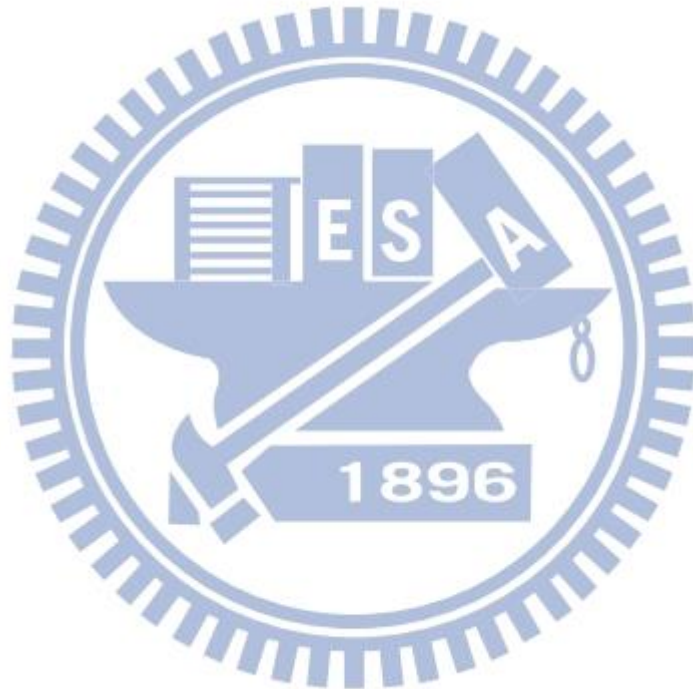
此實驗使用實驗水槽為長 37 公尺、寬 0.92 公尺，實驗水深 0.03 公尺，渠道底部與兩側為光滑平面，水槽前端水流入口設置一蜂巢結構 (honeycomb)，用於整流使水流能平順進入試驗段，並將試驗鋁板布置於水槽中段右岸，試驗鋁板長 15.2 公分、寬 3 公分、高 30 公分，並利用下游尾水板控制上游水深，使水槽內水深不高於實驗鋁板，為一非潛沒式丁壩模擬。

因 Nawachuku 實驗水槽長度過長，如做全水槽模擬過於費時且研究著眼於丁壩周圍，故本研究選用丁壩上下游各 6 公尺處做為模擬區段，其他設置皆與 Nawachuku 實驗相同，上游平均流速為 0.253(公尺/秒)，入流水深 0.3 公尺，約 15,5000 個網格點，時間間距為 0.05 秒，運算總時數 120 秒。

(2) Tominaga et al. (1996)

此實驗使用實驗水槽長 8 公尺、寬 0.3 公尺，實驗水深 0.09 公尺，渠道底部與兩側為光滑平面，並將試驗丁壩布置於水槽中段左岸，試驗丁壩長 0.15 公尺、寬 0.03 公尺、高 0.05 公尺，並控制上游水深使水槽內水淹沒實驗丁壩，為一潛沒式丁壩模擬。

本研究模擬範圍與此實驗區段規模相同，上游平均流速為 0.1(公尺/秒)，入流水深 0.09 公尺，約 12,5000 個網格點，時間間距為 0.05 秒，運算總時間 100 秒。



2.7 實驗結果與驗證

Yazdi et al. (2010)使用 FLUENT 模式，但是在不同的紊流模組下做檢定參數，本研究使用 k- ϵ 模組而 Yazdi 等使用 k- ω 模組來進行模擬，在同樣的實驗條件下，與兩個實驗做比較。

(1) Nawachuku (1979)

於右岸離岸壁 $y/L=1, 1.5, 3, 4$ 處，從 $x=0.92\text{m}$ 到 $x=3\text{m}$ 量測水面流速， L 為丁壩長度，示意圖如圖 2-8。檢定結果如圖 2-9 至圖 2-12 所示，誤差如式 2-12 由取出所有點以模擬值與實驗值相減取絕對值除以實驗值總和，最後除以所有取出點，與 Nawachuku (1979) 實驗數據及模擬值比較，在 $y/L=1, 1.5, 3, 4$ 誤差分別為 2.76%，3.67%，3.45%，4.3%；與 Yazdi et al. (2010) 相比誤差分別為 0.36%，0.72%，0.53%，0.23%。

$$\text{誤差} = \sum_{n=1}^N \frac{|\text{模擬值} - (\text{實驗值})|}{(\text{實驗值}) \times N} \times 100\% \dots \dots \dots (2-12)$$

N 為取出點數。

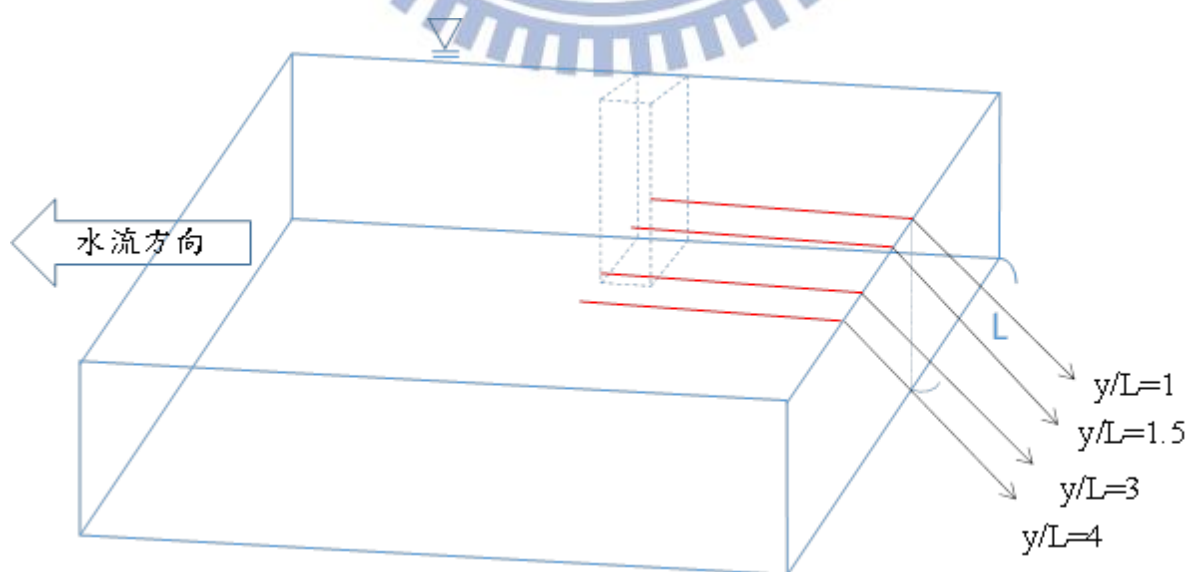


圖 2-8 Nawachuku 量測示意圖

由結果顯示，於靠近丁壩區域模擬皆有不錯的表現，唯有在 $y/L=4$ 遠離丁壩出會有較大的誤差，此是因為在同樣流場變化區域內網格並未加密，導致有較大之誤差，但是整體來說與實驗相比算是有相當良好的成果。



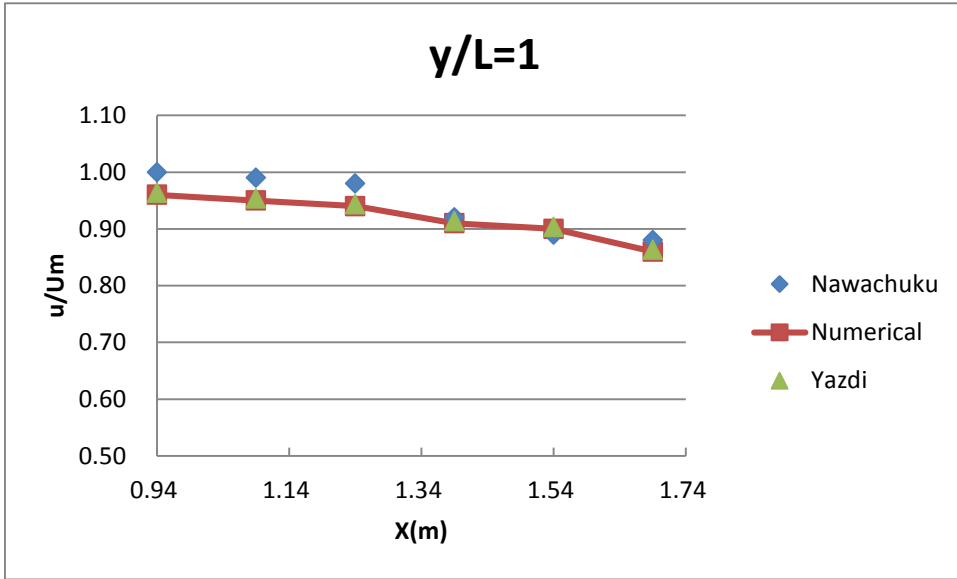


圖 2-9 $y/L=1$ 水面流速比較

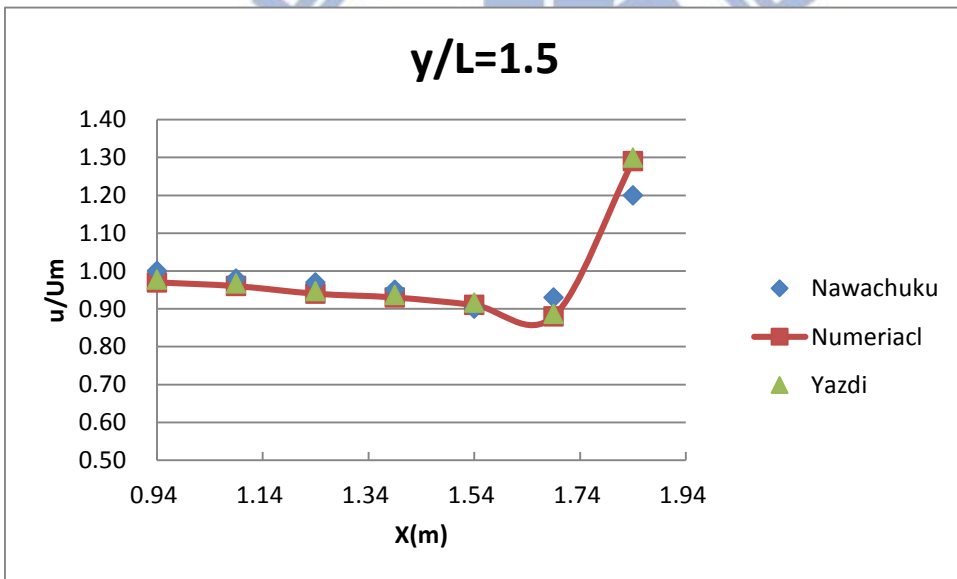


圖 2-10 $y/L=1.5$ 水面流速比較

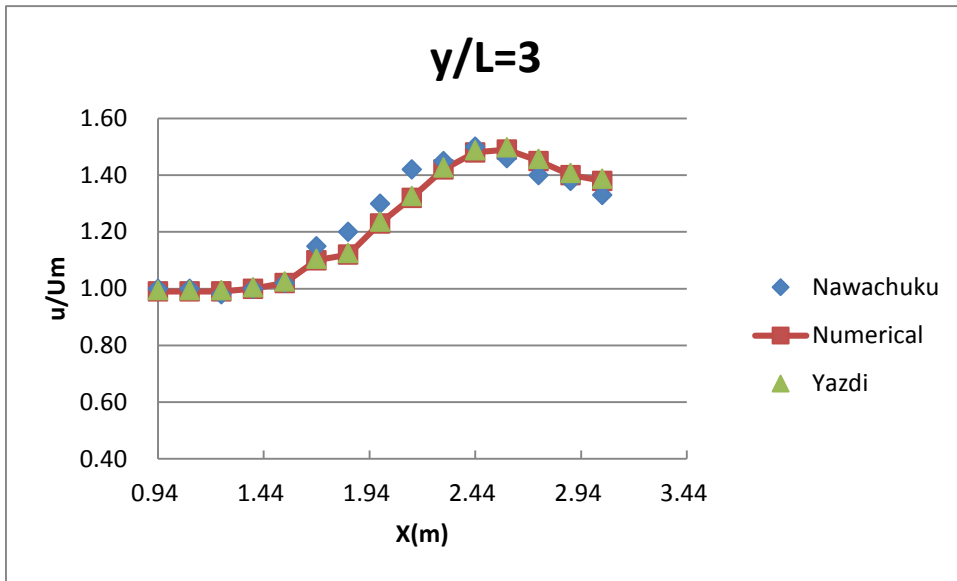


圖 2-11 $y/L=3$ 水面流速比較

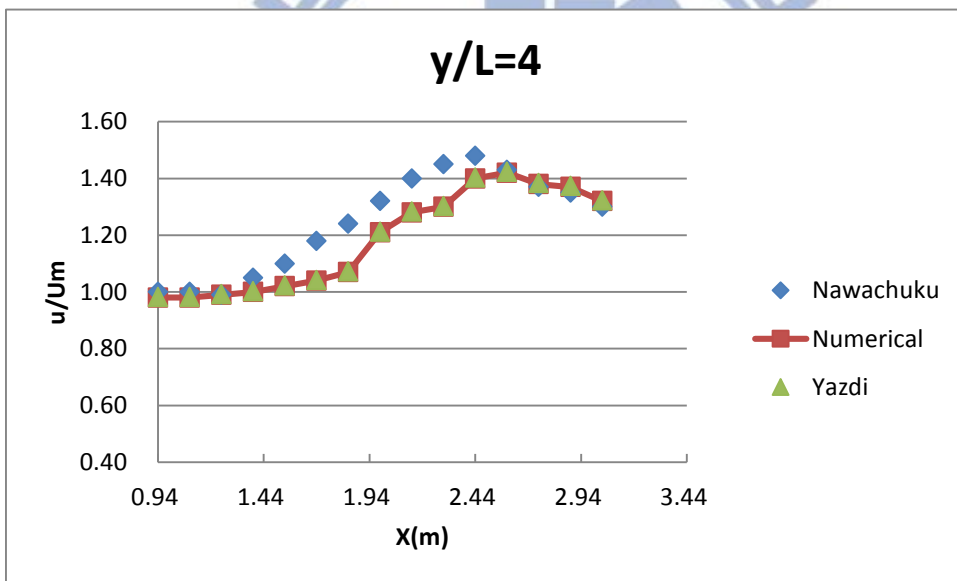


圖 2-12 $y/L=4$ 水面流速比較

(2)Tominaga et al. (1996)

如圖 2-13 所示，分別於 D1(x=4.0m, z=0.07m)、D2(x=4.1m, z=0.01m)、D3(x=4.05m, z=0.02m)、D4(x=4.05m, z=0.07m)取出流速。檢定結果如圖 2-14 至圖 2-17 所示，誤差計算如式(2-12)，與 Tominaga et al. (1996)相比在 D1 到 D4 誤差分別為 1.92%，8.18%，0.55%，6.22%；與 Yazdi et al. (2010)相比誤差分別為 0.22%，0.14%，0.56%，0.43%。從模擬結果來看在 D1 跟 D3 兩個方向模擬成果相當不錯，但是在 D2 水深較深的地方成果比較不佳，其原因在於在水深較深處受邊界層效應影響，使得流況更為複雜，需要更精細的網格才能模擬得更好，而在 D4 可受到自由液面交換所導致。但是從兩個實驗模擬比較結果，FLUENT 在渠道模擬結果能有不錯的表現，參數也可使用於後續研究，驗證所得參數如表 2-1 所示。

表 2-1 模式紊流參數

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε	k	ε
1.44	1.92	1	1.3	0.09	16

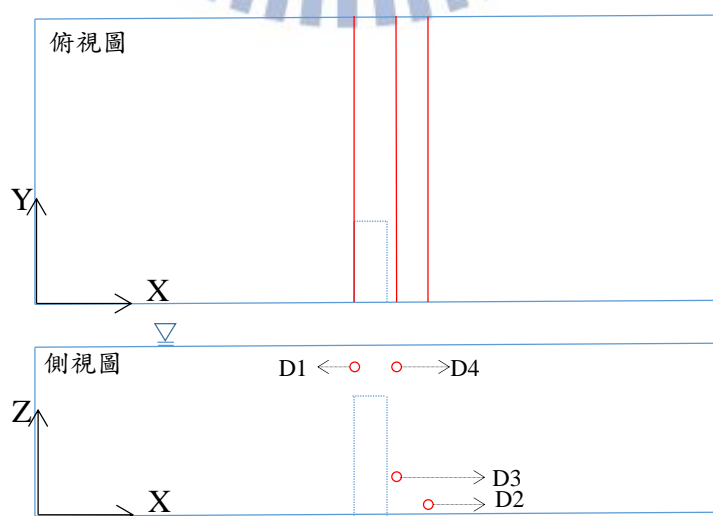


圖 2-13 Tominaga 量測示意圖

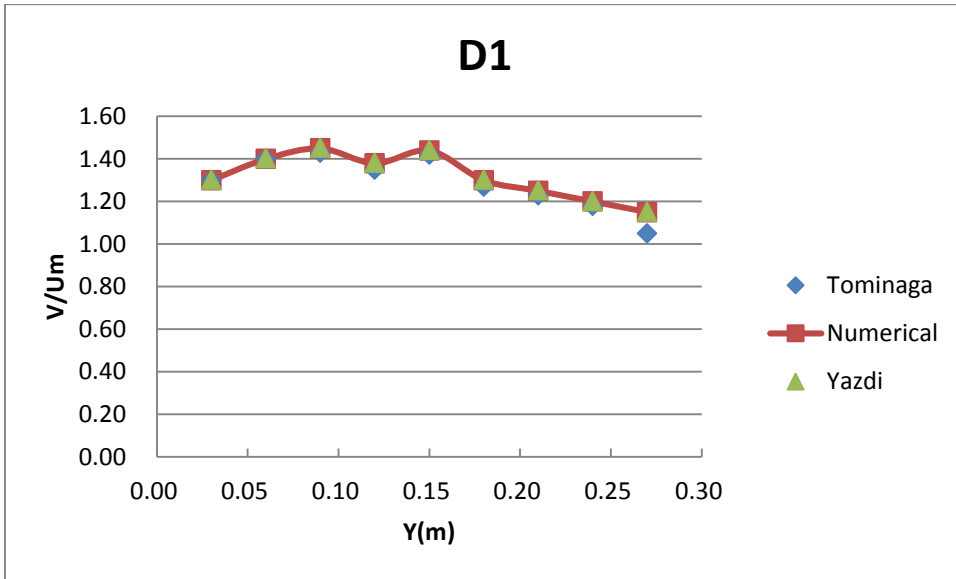


圖 2-14 L1 流速比較

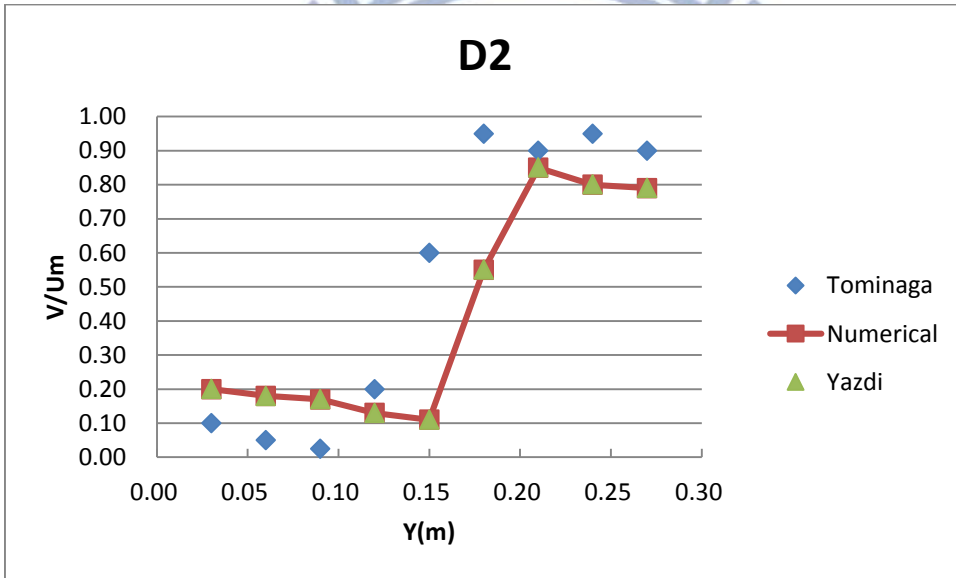


圖 2-15 L2 流速比較

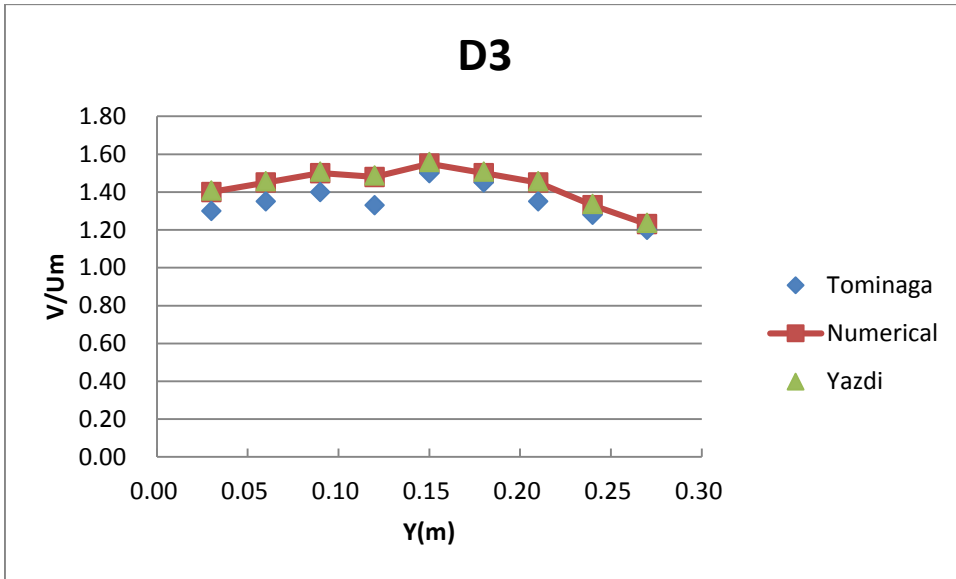


圖 2-16 L3 流速比較

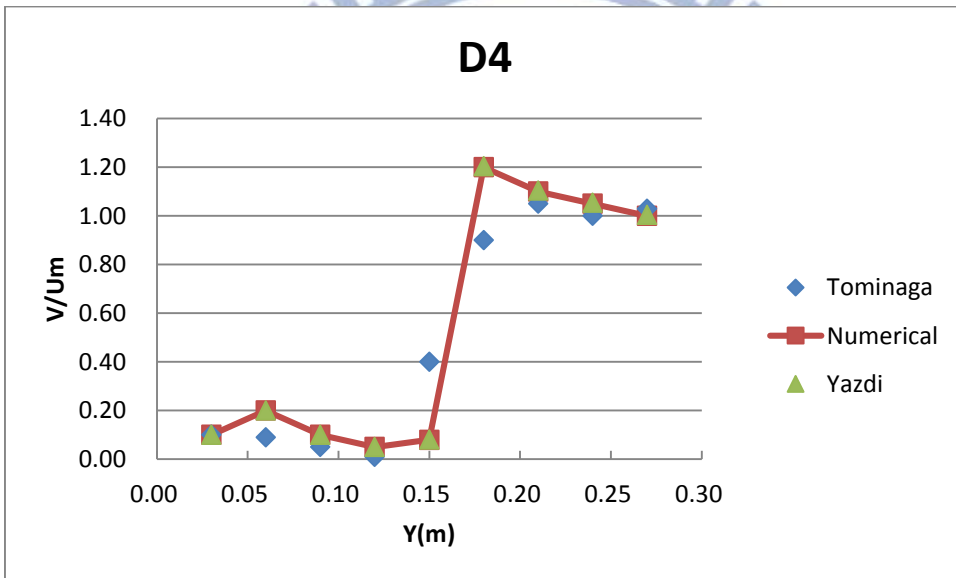


圖 2-17 L4 流速比較

第三章 數值模擬結果討論

3.1 模擬條件配置

3.1.1 因次分析

本文研究對象是對於長直渠道中，觀測丁壩區域內水理現象，為決定影響丁壩區間內渦流分布之水理參數，分別為幾何特性、流體性質與水理特性。

- (1) 幾何特性包含：丁壩長度(L)、丁壩高度(H)、丁壩寬度(B_G)、渠道寬度(B)、丁壩間距(D)。
- (2) 流體特性包含：流體密度(ρ)、動力黏滯係數(μ)。
- (3) 水理特性包含：上游平均流速(V_{up})、上游水深(h)、重力加速度(g)。

依據上述影響因子，利用 Buckingham π-method，分析影響迴流長度(L_{vor})、渦度(ω)、底床剪應力(τ_b)分布之函數關係如式(3-1)、(3-2)所示：

$$F_1(L_{vor}, \rho, \mu, V_{up}, h, g, L, H, B_G, B, D) = 0 \quad (3-1)$$

$$F_2(\omega, \rho, \mu, V_{up}, h, g, L, H, B_G, B, D) = 0 \quad (3-2)$$

選取 ρ、V_{up}、L 為重複參數，將(4-1)式、(4-2)式無因次化如下：

$$\frac{L_{vor}}{L} = f' \left(\frac{\mu}{\rho V_{up} L}, \frac{B_G}{L}, \frac{D}{L}, \frac{B}{L}, \frac{Lg}{V^2}, \frac{h}{L}, \frac{H}{L} \right)$$

(3-3)

$$\frac{\omega L}{V_{up}} = f' \left(\frac{\mu}{\rho V_{up} L}, \frac{B_G}{L}, \frac{D}{L}, \frac{B}{L}, \frac{Lg}{V^2}, \frac{h}{L}, \frac{H}{L} \right)$$

(3-4)

流體密度(ρ)設為固定。 $\frac{\mu}{\rho V_{up} h}$ 是為雷諾數之倒數，將每個案例之初始雷諾數計算後，介於 10000~25000，為紊流狀態，然本研究並未取出不同點位，只針對上游入流量考慮上述情形後，將 $\frac{\mu}{\rho V_{up} L}$ 影響忽略不計。由於丁壩寬度、丁壩高度、上游水深與壩常比值均為定值，故不考慮其變化之影響，並以 $\frac{hg}{V_{up}^2}$ 替換 $\frac{Lg}{V_{up}^2}$ 此即為 $\frac{1}{Fr^2}$ ，將更具代表性。因此，可以將式(3-3)、式(3-4)分別簡化為：

$$\frac{L_{vor}}{L} = f_1 \left(\frac{D}{L}, \frac{B}{L}, \frac{hg}{V_{up}^2} \right)$$

(3-5)

$$\frac{\omega L}{V_{up}} = f_2 \left(\frac{D}{L}, \frac{B}{L}, \frac{hg}{V_{up}^2} \right)$$

(3-6)

根據式(3-5)、式(3-6)可定義出下列因子：

$\frac{D}{L}$ ：無因次丁壩間距長度比； $\frac{B}{L}$ ：無因次河寬比； $\frac{hg}{V^2}$ ：福祿數倒數平方。

3.1.2 渦度

本研究欲利用渦度來顯示丁壩影響流場之情形，渦度在流體力學中常用來描述流體內某點旋轉運動情形，其表示是如下：

$$\vec{\omega} = \vec{v} \times \vec{v} = \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z}, \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x}, \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (3-7)$$

為了更進一步描繪水流通過丁壩後，受丁壩影響產生的迴流情形以及向下流動情形，本文採用渦度來描繪此一現象之強烈程度。

3.1.3 迴流長度

為瞭解丁壩作用範圍，對於迴流長度定義為當流場轉向時，即代表產生迴流現象，由此去決定水流經丁壩後影響水流範圍，用以探討後續丁壩佈設位置。表示如圖 3-1：



圖 3-1 迴流長度圖

3.2 模擬渠道案例

設計渠道模擬方面，將試驗條件做一說明：

- 1、模擬渠道為長 15m、寬 0.4m 之水槽，取水槽中段 3m 長度作為本次模擬的範圍。
- 2、入口處之流體體積進口時採用 1 做起始條件，即入口空氣體積與水體積比 1：1，而後由模式自行運算自由液面。
- 3、第一支丁壩架設於水槽中段與右岸壁垂直相交，離上游邊界 1.5m 處，

第二支架設於其後方 0.24m 處。

4、模式運算從水流進入試驗段到水流流出水槽止。



以上述試驗條件作為基本案例，分別改變丁壩長度(L)、丁壩間距(D)及上游流速(V)，來探討水丁壩間流場行為，設定案例如表 3-1 所式：

表 3-1 案例總表

	編號	上游流速 V_{up} (m/s)	間距 D(m)	壩長 L(m)	壩高 H(m)	入流水深 h(m)
改變壩長	QDL1	0.15	0.24	0.04	0.05	0.15
	QDL2	0.15	0.24	0.08	0.05	0.15
	QDL3	0.15	0.24	0.12	0.05	0.15
改變間距	QD1L	0.15	0.24	0.08	0.05	0.15
	QD2L	0.15	0.48	0.08	0.05	0.15
	QD3L	0.15	0.72	0.08	0.05	0.15
改變流況	Q1DL	0.12	0.24	0.08	0.05	0.15
	Q2DL	0.135	0.24	0.08	0.05	0.15
	Q3DL	0.15	0.24	0.08	0.05	0.15

3.2.1 壩長改變

(1) 模擬條件

模擬條件在間距 0.24 公尺，渠底坡度為零(水平)，網格切割水流方向與渠寬方向格點間距 0.001(m)，水深方向格點間距 0.0005(m)。

(2) 初始條件

模擬開始時，渠道為乾床狀況，即網格內流體均為空氣。

(3) 模擬案例說明

依據原本案例壩長採用 0.08 公尺，探討不同丁壩長度間流場改變情形。

(4) 模擬結果

從圖 3-2 三個案例比較可以發現，隨著壩長增加影響水流加速區域將急遽變大，往左岸處集中，在短丁壩 QDL1 案例中區域流速從 0.15(m/s) 提升到 0.391(m/s)；在 QDL2 案例中區域流速約為 0.790(m/s)；在長丁壩 QDL3 案例中區域流速從 0.15m/s) 提升至 0.933(m/s)，而迴流範圍在 QDL1 案例中由於丁壩長度較短，整體迴流範圍侷限在於丁壩附近，對於整體流場影響較小，而在 QDL3 中由於丁壩長度較長，將加速區域往左岸推出，使得迴流範圍影響範圍變大，對整體流況有著極大影響。

從圖 3-3 渦度比較圖中，在 QDL1 中局部渦度提高集中在壩頭附近區域，渦度值約在 14.3(1/s)；在 QDL2 中，渦度值約在 18.3(1/s)；在 QDL3

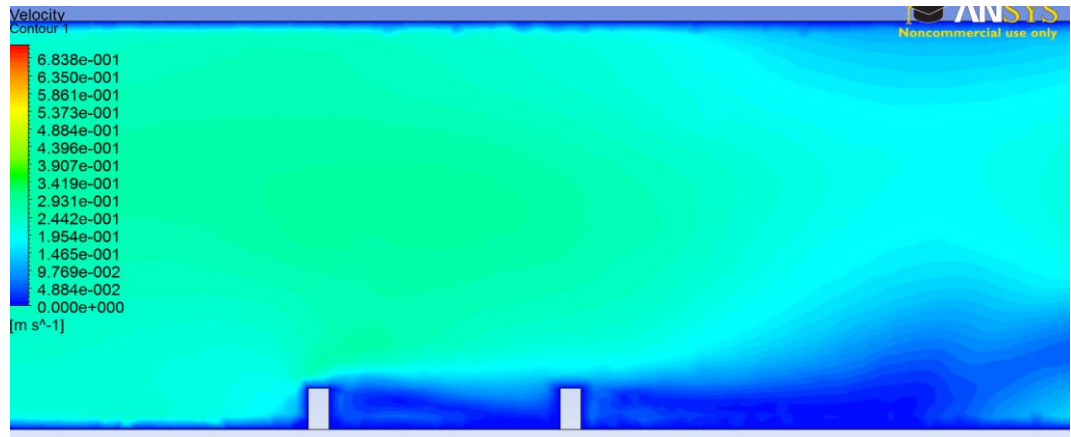
中，渦度值約在 $37.3(1/s)$ ，可以明顯看到在壩頭附近有很強烈渦流效應，此現象與真實情況符合，當渦度強烈區域會對於底床產生強烈掏刷現象，而掏刷將集中在於壩頭附近，隨著丁壩往河中延伸，此效應將會被更加放大。

從流線來看，在 QDL1 中流線主要還是朝著下游前進，並未隨著丁壩的架設而有大幅改變，且在第一支丁壩前之小渦流現象並不明顯；此現象在 QDL3 時就很明顯，流線往左岸大幅集中，而第一支丁壩前小渦流變得非常明顯，整體流場現象非常強烈。

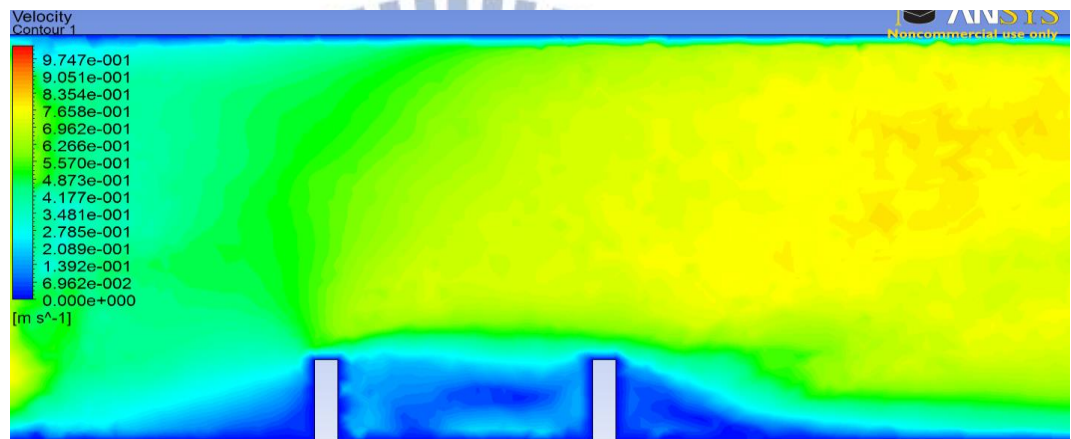


壩頂流速分布

QDL1



QDL2



QDL3

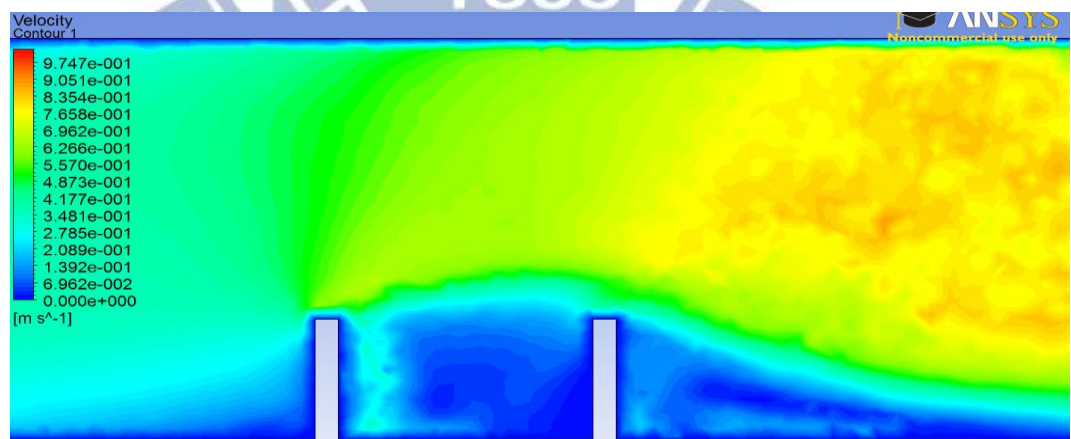
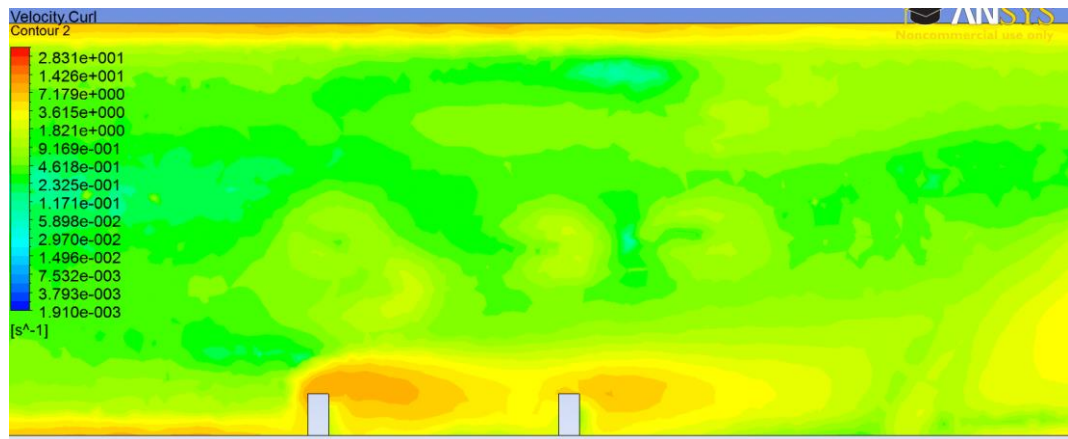


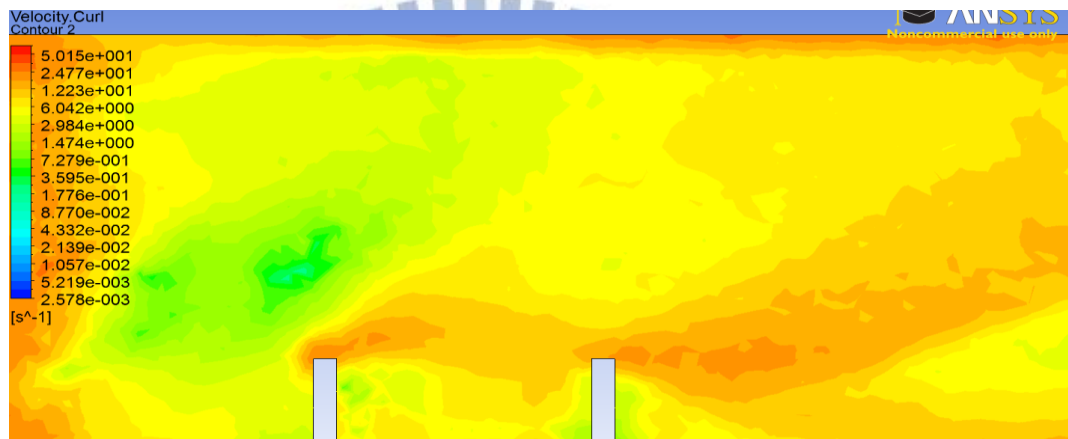
圖 3-2 壩長改變壩頂流速比較圖

底床渦度分布圖

QDL1



QDL2



QDL3

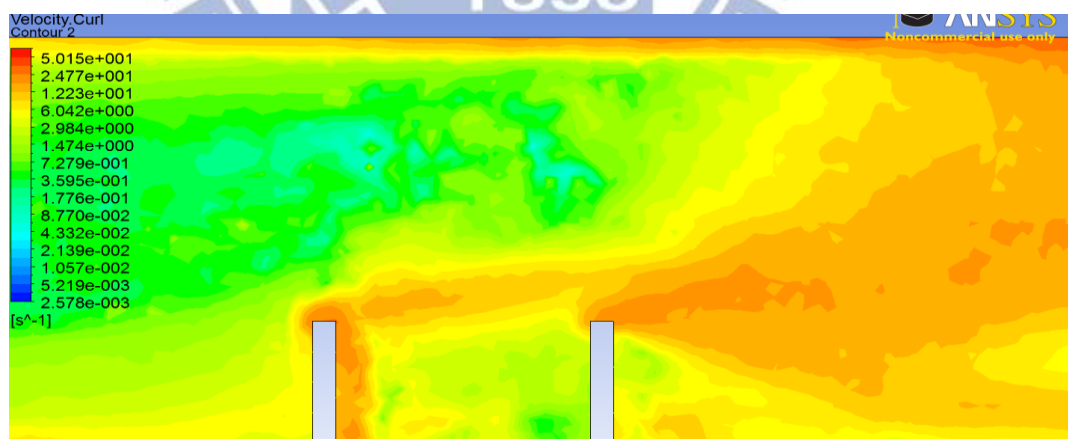
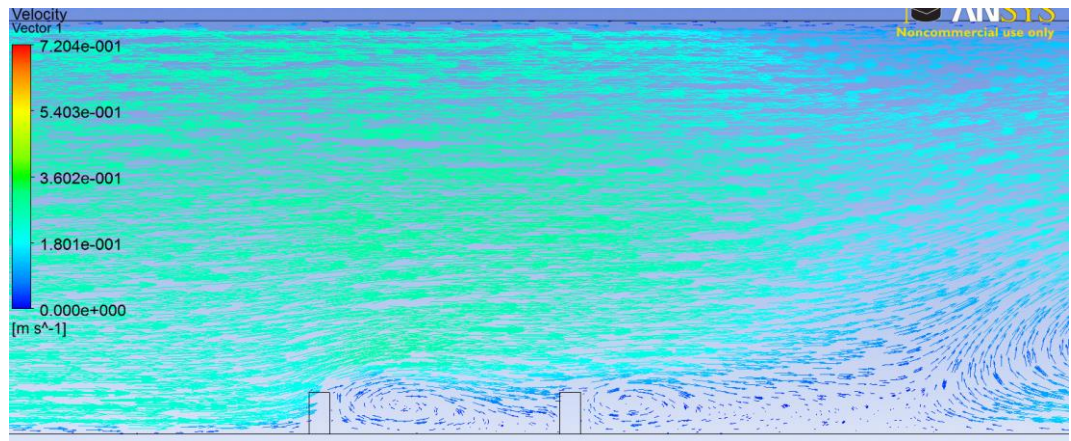


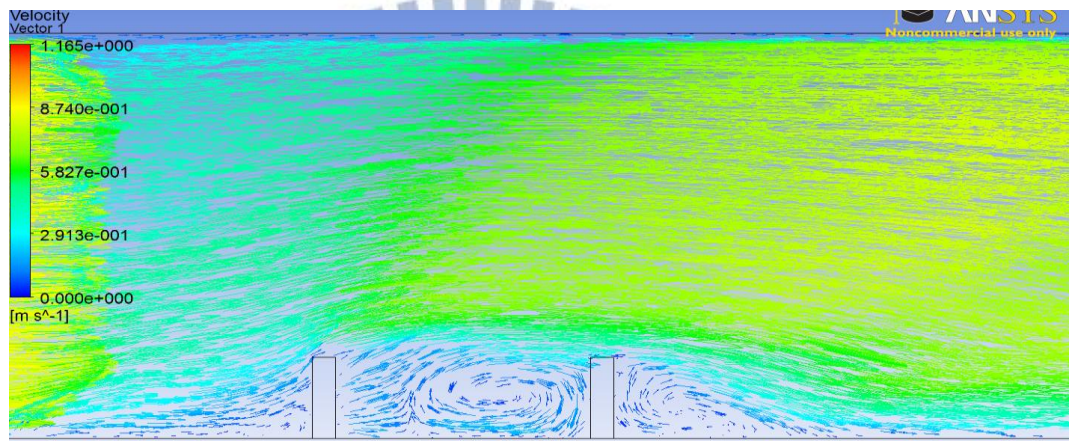
圖 3-3 壩長改變渦度分布圖

壩頂流線分布圖

QDL1



QDL2



QDL3

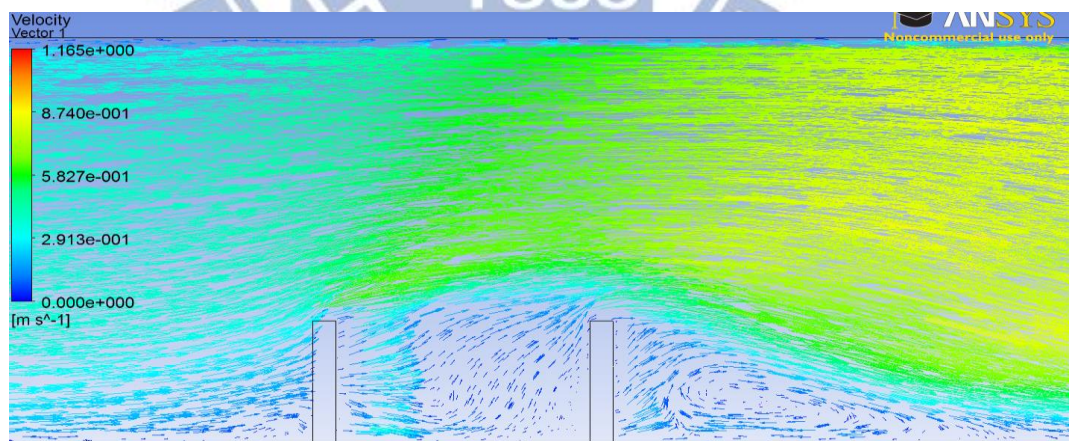


圖 3-4 壩長改變流線分布圖

3.2.2 間距改變

(1) 模擬條件

模擬條件丁壩長度維持 0.08(m)，渠底坡度為零(水平)，網格切割水流方向與渠寬方向格點間距 0.001(m)，水深方向格點間距 0.0005(m)。

(2) 初始條件

模擬開始時，渠道為乾床狀況，即網格內流體均為空氣。

(3) 模擬案例說明

依據原本案例壩長採用 0.08 公尺，在上游入流條件不變下改變丁壩間距，探討丁壩間流場改變情形。

(4) 模擬結果

從圖 3-5 速度比較圖中可看到，局部加速效應並沒有隨著丁壩間距變大而有明顯的改變，依然維持 0.87~1.15(m/s)附近，在案例 QD1L 中水流會受到第二支丁壩影響，在壩體間迴流打轉，而在 QD2L 中可以發現在過壩體後，會漸漸恢復成直行狀態，在碰到第二支丁壩再次產生一迴流現象，在 QD2L 案例中，此迴流區域會與前面迴流區域相互影響，使得第二支丁壩壩前迴流區域局部流速相對於 QD3L；在 QD3L 案例，由於間距拉大後，第一支丁壩與第二支丁壩關係變小，兩者影響範圍開始分離。

在渦度方面，案例 QD1L 壩頭渦度來到 4.31(1/s)，由於兩支丁壩擺設較近使得壩頭沖刷更為劇烈，原本壩頭的沖刷行為會呈帶狀延續到後面一支，

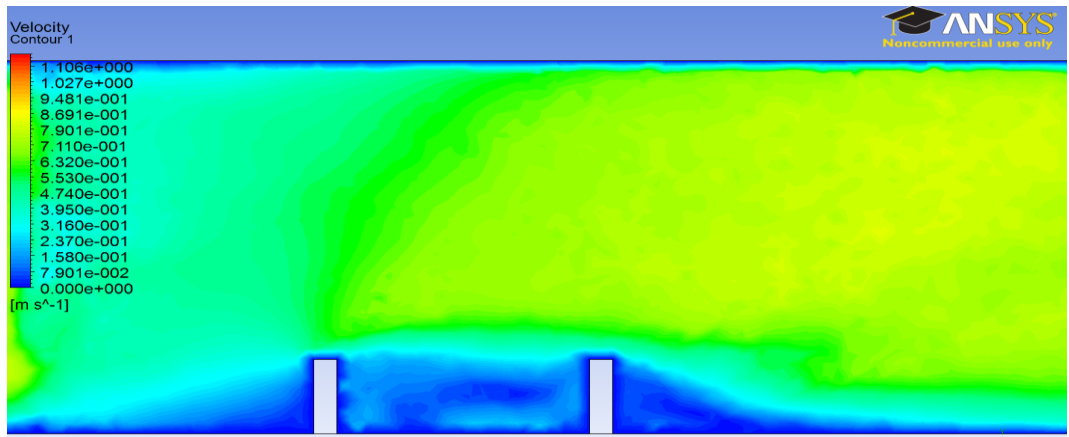
隨著間距拉開，在案例 QD2L 與 QD3L 中壩頭渦度值並沒有改變太多，依然與 QD1L 案例相差不大，但是範圍也開始集中在壩頭附近，並未延續到下一支丁壩，產生帶狀影響行為。

從流線來看，在原始案例中渦流產生在第二支丁壩前面，此是因為當水流過丁壩後，水流原先要在第一支丁壩後形成渦流，但是受到第二支丁壩阻擋反彈而於第二支壩前形成渦流；隨著間距拉大，第二支丁壩壩前渦流與第一隻壩後渦流開始分離，在 QD2L 案例還有些許交互影響，但是在 QD3L 就很明顯分離成兩個渦流。

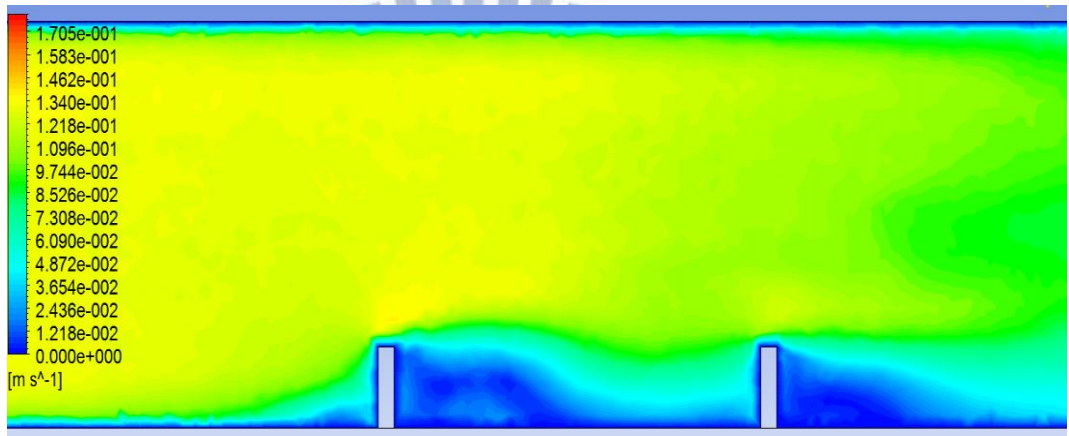


壩頂流速分布

QD1L



QD2L



QD3L

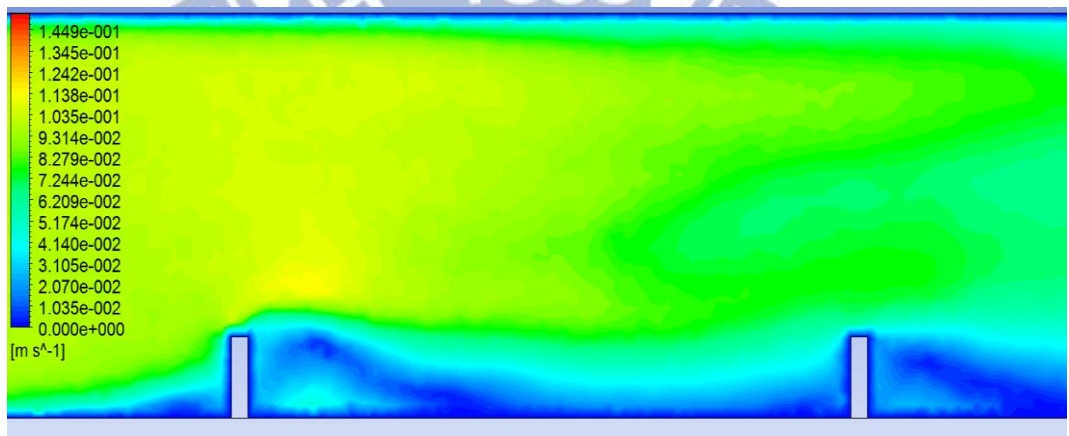
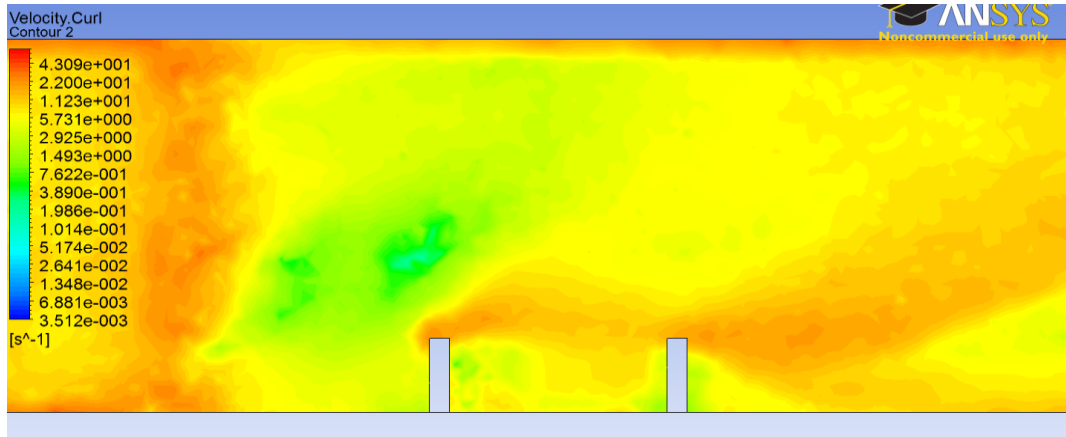


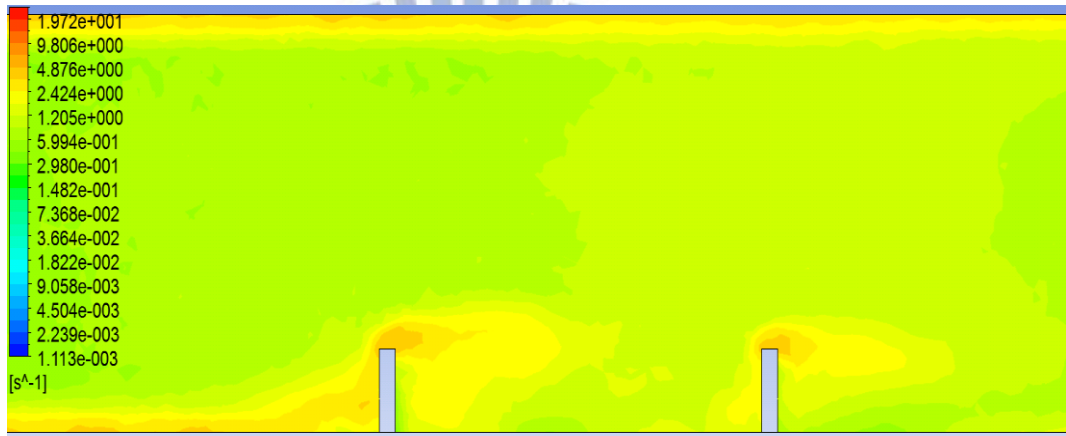
圖 3-5 間距改變壩頂流速比較圖

底床渦度分布圖

QD1L



QD2L



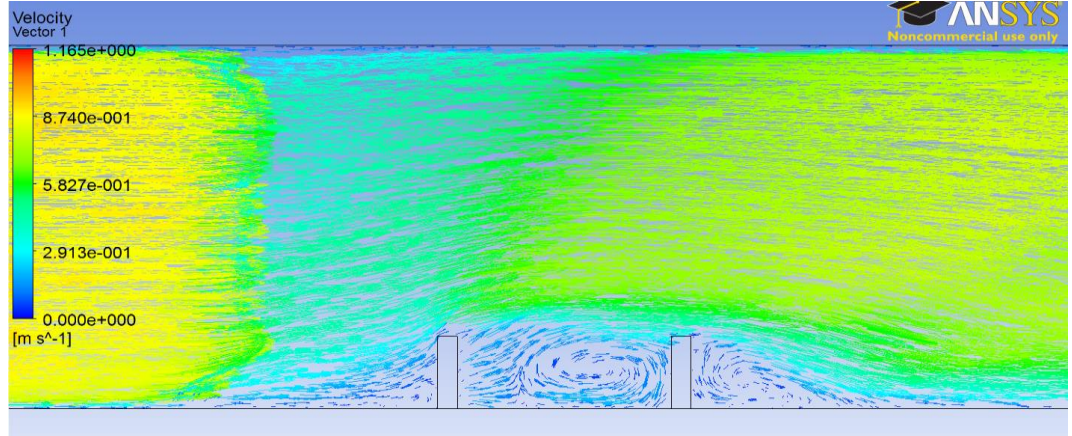
QD3L



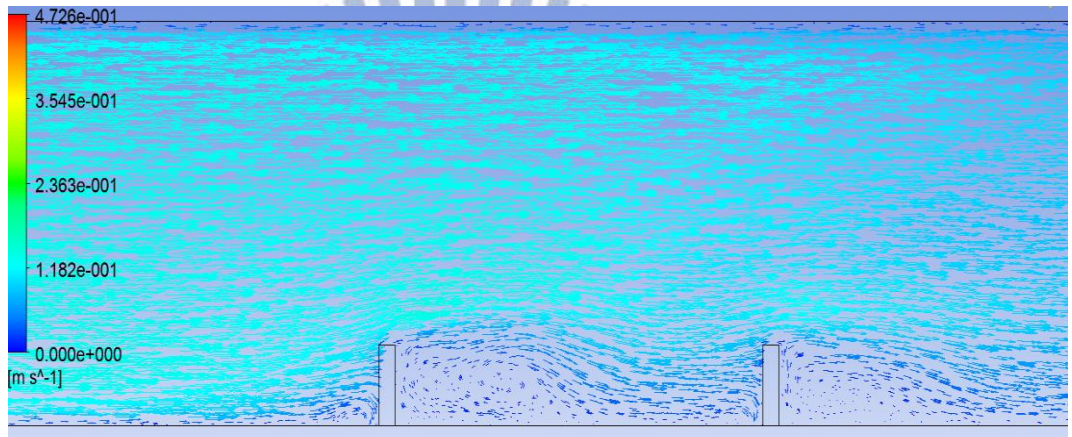
圖 3-6 間距改變渦度分布圖

壩頂流線分布圖

QD1L



QD2L



QD3L

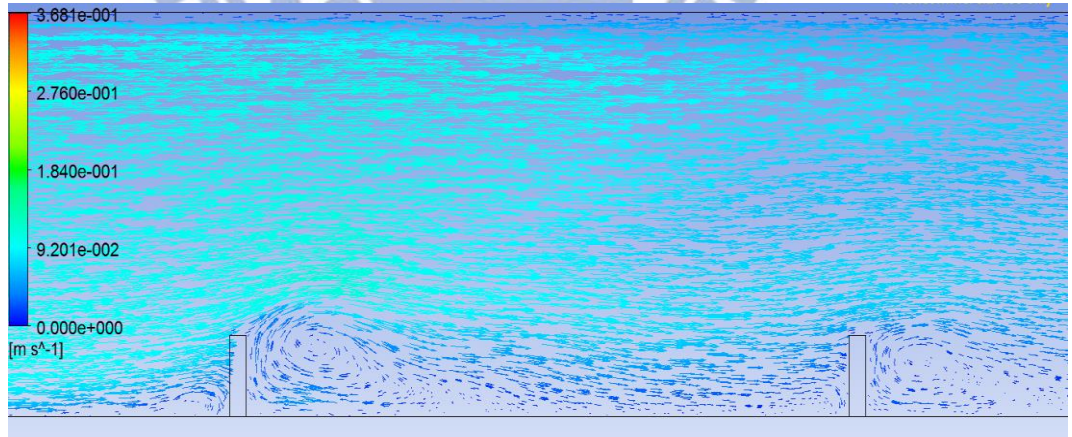


圖 3-7 間距改變流線分布圖

3.2.3 流量改變

(1) 模擬條件

模擬條件上游固定以丁壩長度 0.08(m)，丁壩間距維持 0.24(m)，渠底坡度為零(水平)，網格切割水流方向與渠寬方向格點間距 0.001(m)，水深方向格點間距 0.0005(m)。

(2) 初始條件

模擬開始時，渠道為乾床狀況，即網格內流體均為空氣。

(3) 模擬案例說明

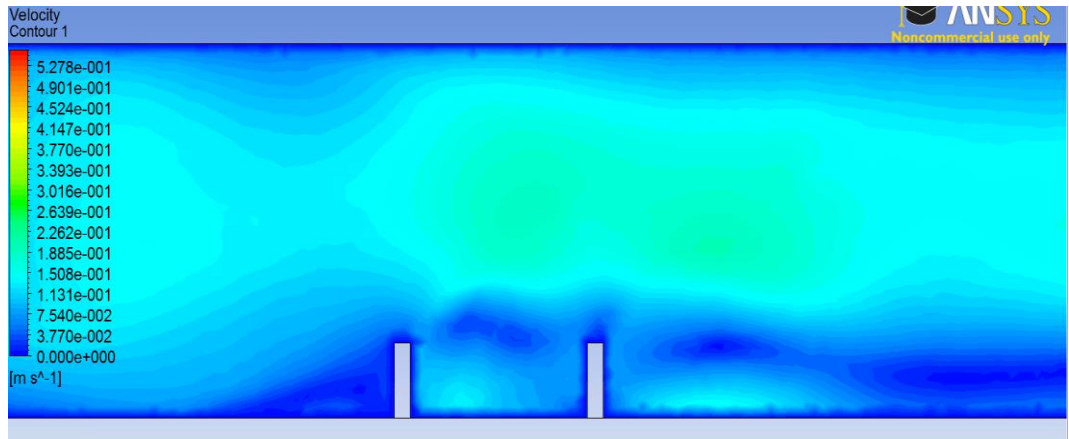
依據原本案例在壩長與間距不變下，改變上游入流速度，探討丁壩間流場改變情形。

(4) 模擬結果

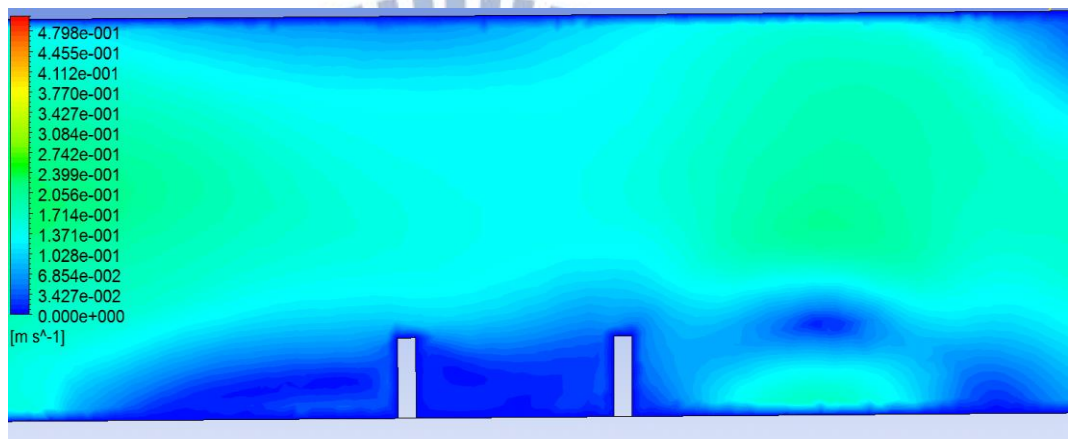
從圖 3-8 速度比較圖中可觀察到，從 Q1DL 案例中低流速時，水流受丁壩影響整體速度改變從 0.12(m/s)增加到 0.193(m/s)；在案例 Q2DL 中，速度從 0.135(m/s)增加到 0.242(m/s)；在案例 Q3DL 中，從 0.15(m/s)增加到 0.323(m/s)，且流速改變區域較低流速時更廣泛，一直綿延至第二支丁壩後，而在低流量則較為集中於丁壩區域。然而在高流量下較低流量劇烈許多，但是整體而言依然是在壩頭有著較為劇烈的沖刷，而流線在高流量下在過丁壩後會明顯地往左岸集中，使得局部加速行為更為明顯。

壩頂流速分布

Q1DL



Q2DL



Q3DL

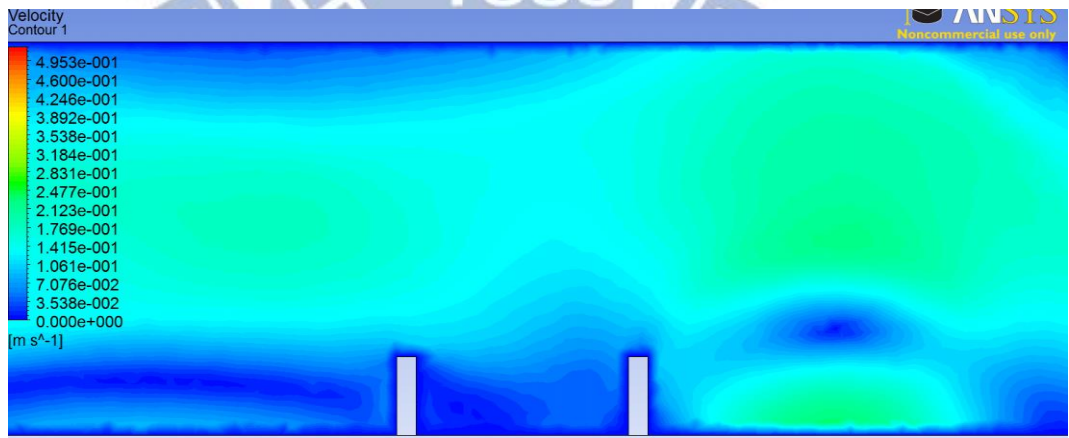


圖 3-8 流量改變壩頂流速比較圖

底床渦度分布圖

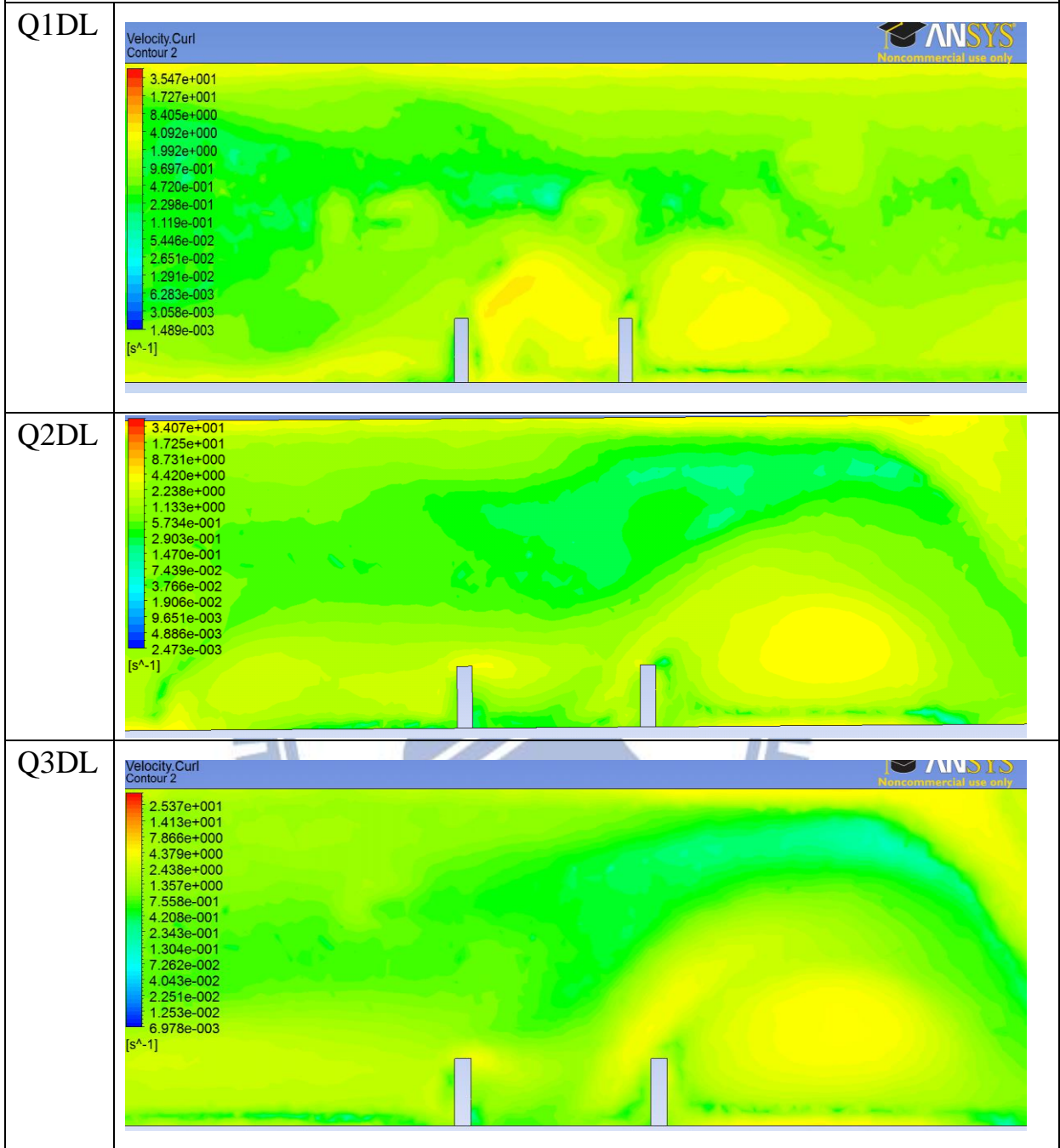
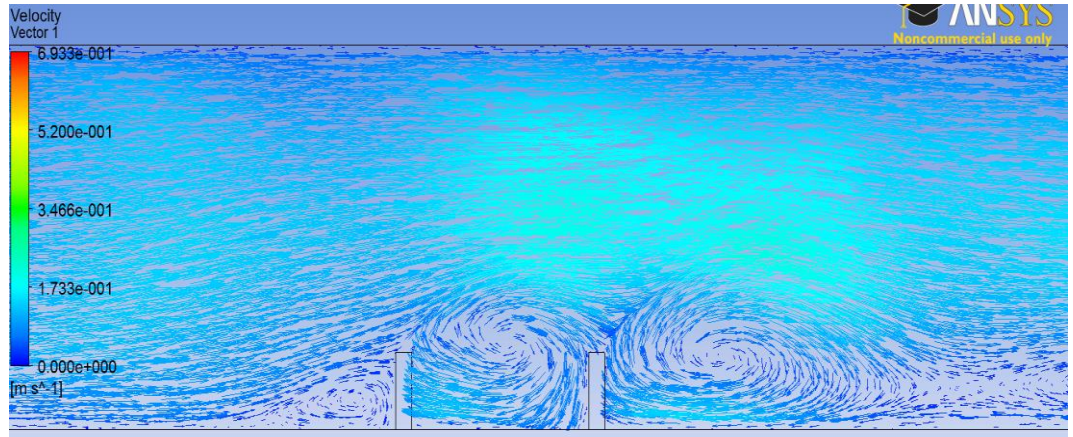


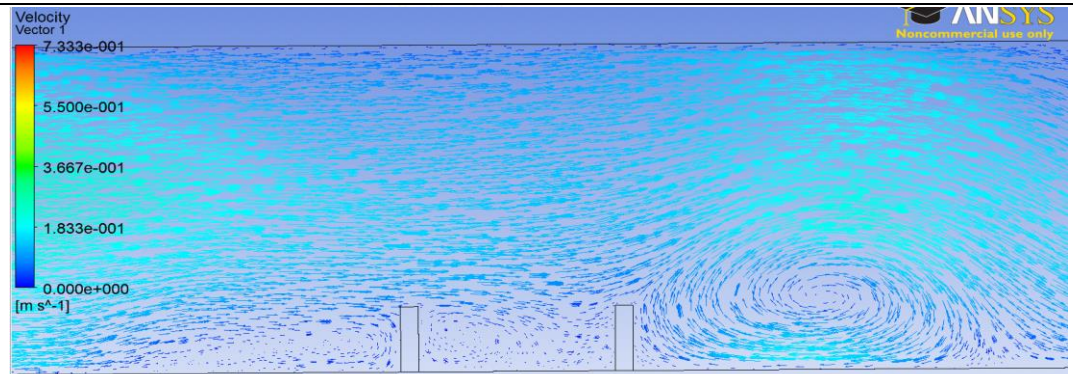
圖 3-9 流量改變渦度分布圖

壩頂流線分布圖

Q1DL



Q2DL



Q3DL

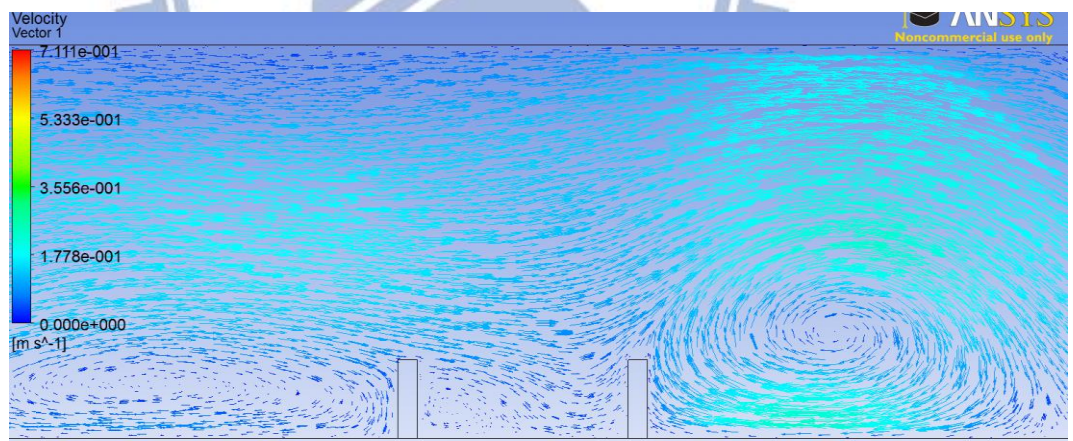


圖 3-10 流量改變流線分布圖

3.3 模擬結果分析

綜合前面三個實驗，我們可以得到表 3-2 之結果：

表 3-2 試驗結果表

	入游流速 Vup(m/s)	ω (1/s)	V_{\max} (m/s)	第一支迴流長 度(m)	第二支迴流長 度(m)	保護長度 (m)
QDL1	0.15	14.35	0.391	0.24	0.12	0.36
QDL2	0.15	26.66	0.791	0.24	0.26	0.50
QDL3	0.15	37.37	0.933	0.24	0.42	0.66
QD1L	0.15	35.44	1.807	0.24	0.28	0.52
QD2L	0.15	16.53	0.087	0.28	0.28	0.28
QD3L	0.15	11.31	0.107	0.42	0.4	0.42
Q1DL	0.12	4.09	0.193	0.24	0.18	0.42
Q2DL	0.135	4.51	0.242	0.24	0.28	0.52
Q3DL	0.15	7.86	0.869	0.24	0.34	0.58

由此表可以發現流量改變，對於整體流場改變影響最不顯著，而間距與壩長改變對於整體流場來說卻有著極顯著的影響；而保護長度(L_p)定義在於水流經過丁壩群後能保護區域長度，丁壩個別迴流長度如有彼此相互覆蓋，則視同整體迴流區域保護長度；但是當丁壩間距過大，兩丁壩中間沒有交互影響的話，保護長度則只能會是單支丁壩產生的迴流長度。

台灣採取在壩長多採用 $L/B=10\%$ 以下，美國規範選用在 $3\% \sim 30\%$ ，日本使用建議在 10% 以下。本文在相同情況條件下對不同丁壩長度作探討，將壩長與河寬比(L/B)為 10% 、 20% 及 30% 之結果，繪如圖 3-11 與圖 3-12 所示，可以發現當 $L/B=30\%$ 時，雖然保護長度比較長，但是壩頭流速急遽

增加，對底床深效果強，所以如欲將丁壩長度再往河中心延伸，則需要對壩頭區域做局部抗沖刷的行為；反之，當 L/B 等於 10% 時，壩頭流速加速情形沒有像高 L/B 般，渦度向下旋轉行為也未如此強烈，對底床刷深效果較小，所能保護的區域較為有限。大於 L/B10% 後，壩頭流速增加趨勢明顯，與台灣日本常用之規範相符，且當丁壩過長時則易使河道束縮，造成河道有局部刷深之可能。

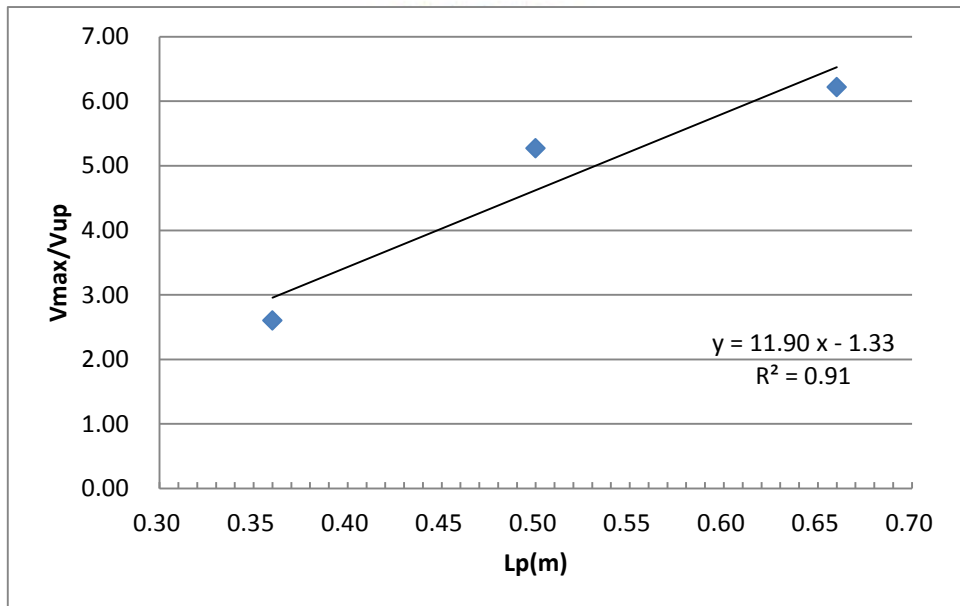


圖 3-11 不同壩長保護長度與壩頭流速關係圖

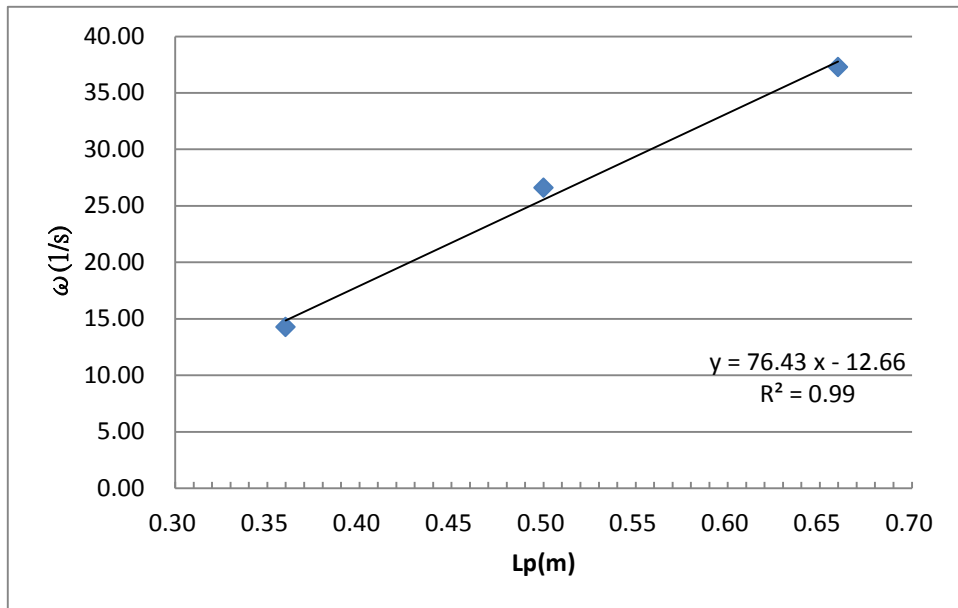


圖 3-12 不同壩長保護長度與壩頭渦度關係圖

間距方面台灣多採用 $D/L=1.0\sim 4.0$ ，美國規範建議在 $D/L=3.27$ ，日本使用建議在 $D/L=3.27$ ，中國水利規範則建議在 $D/L=1.5\sim 8.0$ 間。因此本文再在相同入流條件及 $L/B=20\%$ 的情況下，但不同間距情形下可以畫出如圖 3-13、圖 3-14 與圖 3-15 所示。可以發現如果間距過短時，壩頭流速將局部提升，渦度效應也有所增加，對於丁壩壩頭將產生沖刷，需要對其做保護措施以避免局部破壞行為；隨著間距拉大，壩頭流速開始下降，保護長度也有提升，但是當間距超過丁壩長度 5 倍(0.4m)時，保護長度並沒有隨之提升，反而開始縮短，此是因為當間距過大，超過原先一支丁壩所具有之保護長度，然則第二支丁壩將與第一支丁壩沒有交互作用，使得第二支丁壩開始慢慢回復成單支獨立狀態。規範所建議之範圍為使水流撞擊在後續丁壩中點處，美國與日本使用之間距是丁壩保護堤岸效果最佳之比例，當間距繼續拉大，

丁壩間交互影響作用開始下降，除了中國規範有超過 5 倍壩長外，其他國家規範大多採用在 5 倍以下，以確保丁壩間能有相互作用，達到保護堤岸效果。

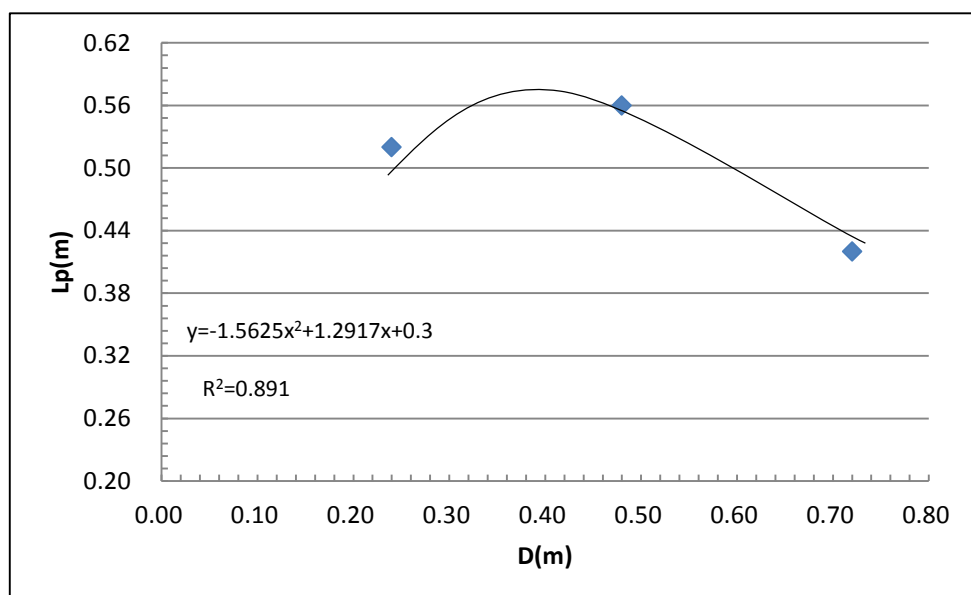


圖 3-13 不同間距與保護長度關係圖

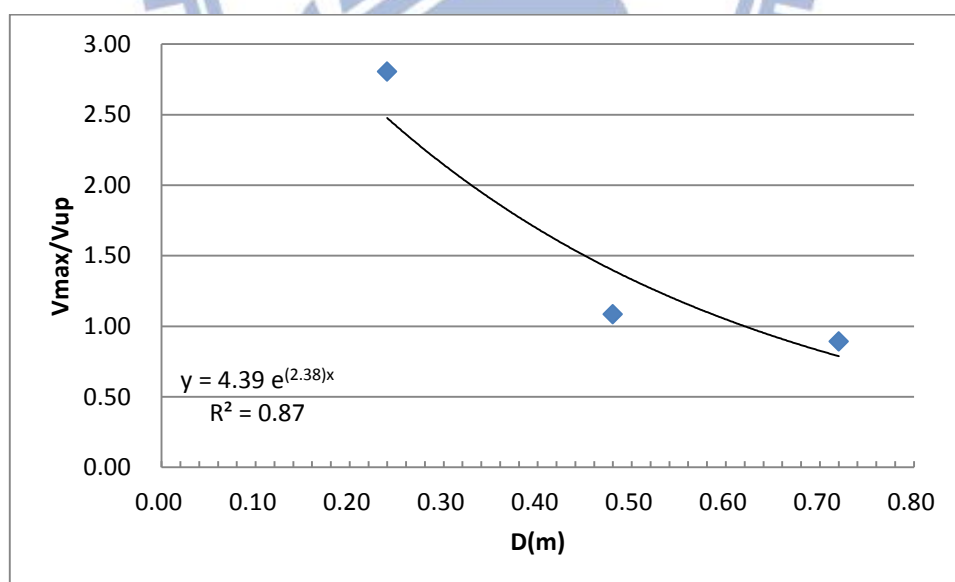


圖 3-14 不同間距與壩頭流速關係圖

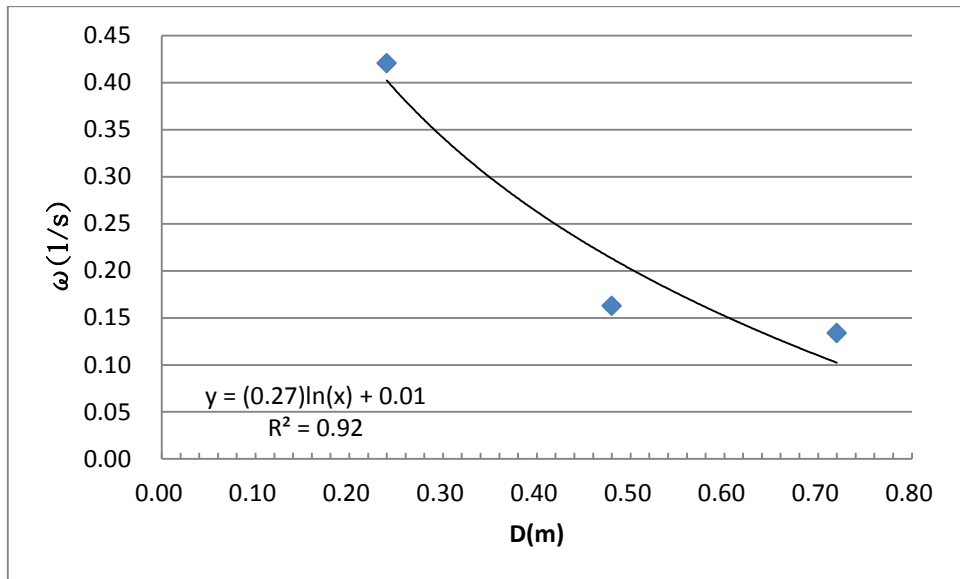


圖 3-15 不同間距與渦度關係圖

而在相同入流條件及 $L/B=20\%$ 的情況，改變上游流速將其繪製成圖 3-16 與圖 3-17，由此圖可以發現隨著流量增高保護長度會有提升，但是提升幅度卻沒有如同改變壩長或是間距有效果，且渦度卻會大幅提升增加水流向下刷深效應，對於丁壩與底床都需要做額外保護措施。

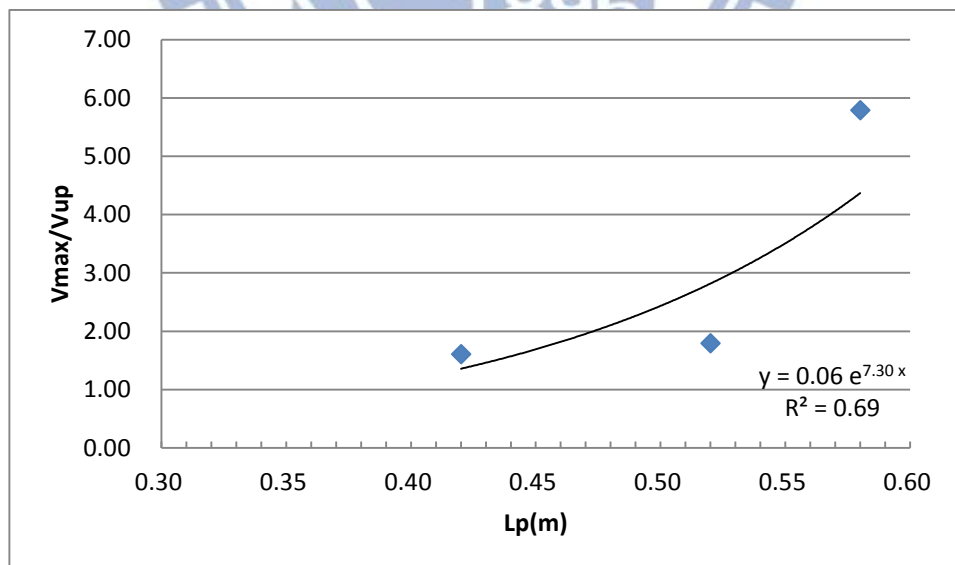


圖 3-16 不同流速保護長度與速度關係圖

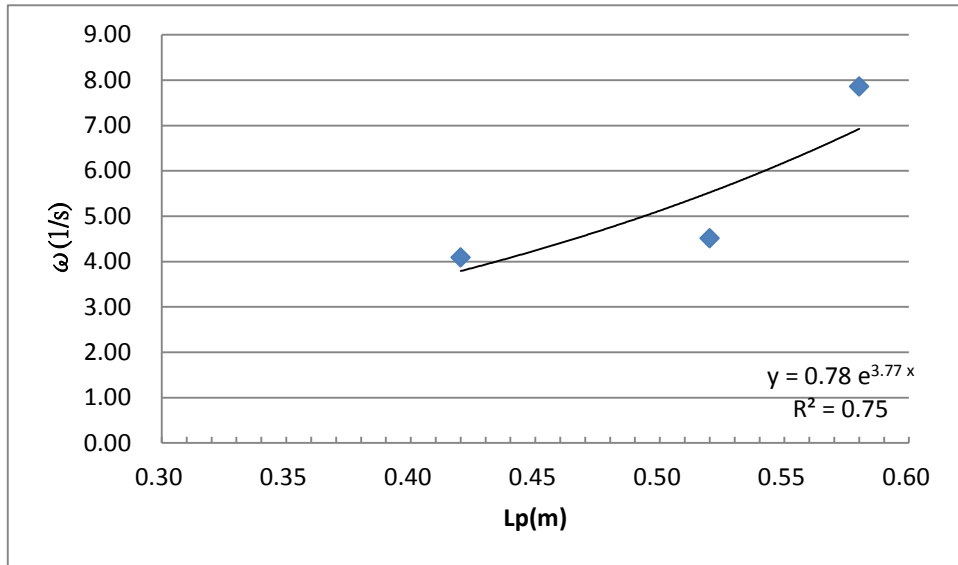


圖 3-17 不同流速保護長度與渦度關係圖

將丁壩長度、上游流況與丁壩間距做線性迴歸後，可以得到迴流長度

L_p 與壩頭渦度 ω 關係式分別如下：

$$\frac{\omega L}{V_{up}} = -16.18 \times \frac{D}{L} - 1.94 \times \frac{B}{L} + 891.65 \times Fr^2 - 16.18, R^2=0.863 \dots (3-2)$$

$$\frac{L_p}{L} = -0.35 \times \frac{D}{L} + 0.73 \times \frac{B}{L} - 159.57 \times Fr^2 + 137, R^2=0.707 \dots (3-3)$$

當丁壩為潛沒式時，在本研究實驗範圍 $B/L=(10\% \sim 30\%)$ 、 $3L \leq D \leq 9L$ 內，這兩個公式可用以推估丁壩擺設對於壩頭沖刷嚴重程度以及丁壩保護能力，但仍能提供對壩頭區域做加強抗沖刷及保護岸壁工法及丁壩擺設初步的參考依據。

第四章 結論與建議

4.1 結論

隨著三維計算流體力學模式發展更趨完善、模擬範圍更廣泛以及電腦運算能力提升下，利用數值模擬作為水工試驗與工程設計之前置作業已成趨勢。本文以數值模擬的方式，了解潛沒式丁壩區間內流場情況。模擬其流況並觀察其變化，得到以下結論：

- (1) 丁壩長度與壩頭沖刷有明顯的相關，因此在擺設長度上需要有更多的考量，在 L/B 過長時，對於整體流場行為改變將非常劇烈，對於水流向下刷深行為需要更留意。
- (2) 丁壩間距拉大，壩頭流速會有減緩趨勢，能保護岸壁的長度也會開始拉長，但是當超過壩長五倍，兩丁壩間交互行為將會趨於薄弱，所以擺設需更留意。
- (3) 當丁壩為潛沒式時，上游流量改變對於整體流場行為改變顯著，同樣丁壩擺設情形，高流量會比低流量對於側向會有較佳的保護效果，但是向下刷深情況卻會加劇。
- (4) 丁壩長度會大幅改變加速區域的範圍，因此當 L/B 超過 30% 後，需要再考慮對向岸壁與底床刷深的影響。
- (5) 式 3-2 與式 3-3 可作為未來工程規畫上初步考量，在適當的條件下，能對於丁壩主體安全與河床安全有更簡單的參考。

(6)FLUENT 在做渠道模擬可以有良好的精度，未來可以投入其他含自由液面的研究。

4.2 建議

(1)三維模擬運算費時，如果僅以個人電腦來進行運算，一個案例可能都是五到七日起。建議日後可利用 FLUENT 平行運算設定，以減少計算時間。

(2)本研究僅就壩長與間距改變，並未探討水流攻角於流況的影響，如再對壩高改變之試驗，整體流場行為變化將更為完善。

(3)本研究著重在潛沒式丁壩，未來可以對非潛沒式的做進一步探討。

(4)本研究僅就定床討論，未來可對動床做更多的研究。



參考文獻

1. McCoy, A.W., 2006. Numerical investigations using LES: exploring flow physics and mass exchange processes near groynes. University of Iowa.
2. Chen, N.S. and Li, C.H., 1989. Numerical solution of the flow around a spur dike with turbulent model. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 3, 11-23.
3. Elawady, E., Michiue, M. and Hinokidani, O., 2001. Movable bedscour around submerged spur-dikes. Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, VOL.45.
4. Ettema, R. and Muste, M., 2004. Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flatbed channel. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 130(7), 635-646.
5. Fluent Manual, 2005. Manual and user guide of Fluent Software. Fluent Inc.
6. Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid methods for the dynamic of free boundaries. Journal of Computational Physics, 39, 201-225.
7. Sarveram, H., Shamsai, A., and Banihashemi, M.A., 2012. Two-dimensional simulation of flow pattern around a groyne using semi-implicit semi-Lagrangian method, Academic Journals.
8. Karami, H., Ardeshir, A., Behzadian, K., and Ghodsian, M., 2013. Protective spur dike for scour mitigation of existing spur dikes, Journal of Hydraulic Research Vol. 49, No. 6, pp. 809–813.
9. Karami, H., Basser, H., Ardeshir, A., and Hosseini, S.H., 2012. Verification of numerical study of scour around spur dikes using experimental data” Water and Environment Journal.
10. Basser, H., Ardeshir, A., and Karami, H., 2012. Numerical simulation of flow pattern around spur dikes series in rigid bed, 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.
11. Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974. The numerical computation of turbulent flows. Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269-289.
12. MacCoy, A., Constantinescu, S.G., and Weber, L., 2008. Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with series of groynes. ASCE, Journal of Hydrodynamics Engineering, 134(2), 157-172.

13. Kurzke, M., Weitbrecht, V., and Jirka, G.H., 2002. Laboratory concentration measurements for determination of mass exchange between groin fields and main stream. Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, 76128 Karlsruhe, Germany.
14. Mayerle, R., Toro, F.M., and Wang, S.S.Y., 1995. Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes. *Journal of Hydraulic Research*, 33(2), 243-256.
15. Osman, M., Ibrahim, A.A.Abbas., 2008. Empirical assessment of local scour at the head of groynes. *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine*, Vol.1, 2008.
16. Yossef, M., and de Vriend, H., 2010. Sediment exchange between a river and It's groyne fields: Mobile-Bed. Experiment. *J. Hydraul. Eng.* 2010.136:610-625.
17. Molls, T., Chuadry, M.H., and Khan, K.W., 1995. Numerical simulation of two dimensional flow near a spur dike. *Journal of Advance in Water Resources*, 118(4), 227-236.
18. Nwachukwu , B.A., 1979. Flow and erosion near groyne-like structures, Thesis(PhD). Edmonton, Canada: University of Alberta.
19. Olsen, N.R.B and Haun, S., 2010. Free surface algorithms for 3D numerical modelling of reservoir flushing. Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-00-7.
20. Peng, J., 2004. Flow and local scour around spur-dike. Zheng Zhou, China: The Yellow River Press Publications.
21. Peng, J., Nobuvuki, T., and Toshihisa, K., 2002. Numerical modeling of local scour around spur-dikes. *Journal of Sediment Tesearch*, 1, 25-29
22. Tingsanchali, T. and Maheswaran, S., 1990. 2-D Depth-average flow computation near groyne. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116(1), 71-86.
23. Tominaga, A. and Chiba, S., 1996. Flow structure around a submerged spur dike. *Proceedings of annual meeting of Japan Society of Fluid Mechanics*, 317-318.
24. Uijtewaal, W.S.J., 2005. Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: laboratory experiments. ASCE, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(9), 782-791.
25. Versteeg H.K. and Malalasekera, W., 1995. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Harlow: Longman Publications.

26. Tang, X.L., 2007. Experimental and numerical investigations on secondary flows and sedimentations behind a spur dike. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, 19(1), 23-29.
27. Tang, X.L., Ding, C., and Chen, Z.C., 2006. Large eddy simulations of three-dimensional flows around a spur dike. *Journal of Tsinghua Science and Technology*, 11(1), 117-123, ISSN1007-0214 19/1.
28. Yazdi J., Azamathulla H.M., Ghani, A.A., 2010. 3D simulation of flow around a single spur dike with free-surface flow. *J. River Basin Management* Vol.8, NO.1(March 2010), pp.55-62
29. Zhou, Y., 2001. Large-eddy simulation of 3-D flow motion around submerged spur-dike. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 18(5), 28-36.

