

水田區調洪減災生態功能之三維度量化分析與 試驗研究

3-D Quantitative Investigation and Field Experiment on Flood-Detention Effect for Paddy Fields

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
副教授

張倉榮*

Tsang-Jung Chang

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
博士班研究生

高宏名

Hong-Ming Kao

國立台灣大學
電機工程學系
碩士班研究生

林玫珊

Mei-Shan Lin

摘 要

本研究針對水田區調洪減災生態功能，以三維度量化分析與試驗研究二者並進之方式，探討三維度自由液面水田區之流場受水稻植栽帶的水理阻滯效應，以及水田區對調滯洪水與下游出口流量之影響，藉以量化瞭解水田區對於生態環境之貢獻度。本研究首先針對台灣地區水稻植栽的特性，例如植栽高度、植栽阻水面積、植栽密度、阻力係數等因子，進行水稻體阻水效應參數之現地量測，整理計算各種不同水稻生長時期的特性因子試驗值，以求符合台灣地區水田現地狀況。

本研究繼而進行三維度自由液面水田區水理模擬，數值模式採用有限體積法 (finite volume method) 離散控制方程式，搭配 PISO 法耦合速度和壓力，使得整個流場符合質量守恆及動量守恆。紊流計算採用 $k-\varepsilon$ 紊流模式配合體積分率法模擬自由液面流場，且加入邊牆函數處理底床邊界周圍流場，再應用孔隙介質流理論模擬水田區植栽帶對水流的阻滯效應。模式驗證係參照 Nepf 及 Vivoni 在 2000 年所作的水槽試驗，模擬含有植栽帶之自由液面明渠流。最後，研究案例以單坵塊水田區進行模擬，研究發現當植栽高度愈高時，水田區內的阻水效應愈明顯。水稻植栽於 10~40 cm 之間可較休耕時期降低 2%~10% 之洪峰流量。洪水在洪峰過後緩緩地流出水田區，使得出流歷線重新分配，宛如人工濕地，足證水稻田可提供良好的滯洪功能。

關鍵詞：水稻田，調洪生態功能， $k-\varepsilon$ 紊流模式，體積分率法，孔隙介質。

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程系副教授，106 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，tjchang@ntu.edu.tw

ABSTRACT

The study conducts the 3-D quantitative simulation as well as experimental study to analyze and evaluate the function of flood detention for paddy fields. The 3-D free-surface flow with paddy plants inside are considered to investigate the influences of paddy fields on peak flood attenuation and the temporal distributions of outlet discharge. The ecological multi-functional of paddy fields are quantified. In the present study, a series of in-site experiments are firstly carried out to obtain the characteristics of paddy plants, such as plant height, interceptive area of plant, canopy density and drag coefficient etc, for different growth periods. The experimental results are further inputted into the 3-D numerical model to simulate the 3-D free-surface vegetative flow of paddy fields in Taiwan.

Next, a 3-D numerical model, adopting the finite volume method and the PISO scheme, is introduced to solve the governing equations. The $k-\varepsilon$ turbulence model together with the volume of fluid (VOF) technique, wall function and porous media are used in the model to simulate the vegetative free-surface flow fields. The 3-D numerical model is verified by the vegetative free-surface experiment given by Nepf and Vivoni (2000). The agreement between the experiment and numerical result is quite satisfactory. A series of numerical simulations for different plant heights ranging from 10cm to 40cm are conducted. The influences of paddy fields on the detailed flow depths and velocities are also studied. It is concluded that, in comparison with the fallow case, paddy fields can reduce the peak discharge about 2%~10% for different plant heights. Thus, paddy fields can gradually mitigate flood movement and redistribute the outlet flow discharge. It behaves just like artificial wetlands and indeed provides flood detention function.

Keywords: Paddy field, Flood-detention function, $k-\varepsilon$ turbulence model, Volume of fluid, Porous media.

一、前言

台灣地區水稻田的生產功能將會因為加入 WTO 所造成國內稻米價格之衝擊，而面臨相當程度的打擊。水田生態環境為整個台灣地區生態系統重要的一環，為了避免水稻田因生產功能之降低，轉而進行休耕、轉作、土地利用改變等措施，而造成生態環境之負面影響，水稻田生態環境功能多樣性的研究越來越受到重視，亦是行政院農田水利主管機關的重點議題之一。以農業生態環境為例，水田生態環境實為整個農業生態系統中最重要的一環，水稻田除了傳統之糧食生產功能外，尚具有安定河川流況、調蓄暴雨洪水以減低下游排水尖峰流量、涵養地下水源、淨化水

質、調節微氣候、防止土壤沖蝕、洗鹽及提供水鳥庇護、繁殖、覓食場所等生態性機能，也具有提供農村美麗景觀及良好居住環境等生活性機能。由於水稻田內的植栽帶可在水流通過時產生阻水效應，使得洪水被滯留於水田區中而降低下游排水尖峰流量，此項生態功能在過去甚少被提及。

為減少水田因為轉作、休耕、土地利用改變對生態環境產生負面的影響，並進一步尋求利用休耕水田維持其生態環境功能之方法與必要措施，首先必須就水田在生態環境各項功能加以量化評估，瞭解各地區水田在生態功能上之貢獻程度，並就休耕水田如何維持及進一步提高其生態功能之各種方法加以分析、試驗、探討，以研擬

表 2.1 水稻生長週期基本介紹(鍾，2004)

生長時間 (天)	名稱	特性
0~15	插秧成活期	地上部分生長停止，新根產生。
15~30	分蘗初期	莖之加粗，高度伸長極微。
30~45	分蘗末期	莖桿發育成熟，已完成分枝。
45~60	開花初期	出穗後不久稱之。
60~75	開花末期	稻穗皆已長出。
75~90	成熟初期	莖葉之養份送至子實。
90~105	成熟中期	米粒之內容開始為乳狀，次呈現糊狀。
105~120	成熟末期	子實堅硬而達成完全成熟。

具體措施。而本研究即是針對水田區調洪減災生態功能進行量化分析。本研究首先將建立水田區調洪減災功能分析模式，以三維度量化分析與試驗研究二者並進之方式，探討三維度自由液面水田區之流場受水稻植栽帶的水理阻滯效應，以及水稻植栽帶對調滯洪水與下游出口流量之影響，藉以量化瞭解水田區對於生態環境之貢獻度。

二、水稻植栽阻水效應參數之現地量測

2.1 水稻生長週期基本介紹與試驗分期

在台灣一般稻作的生長，從插秧至收成約 120 天左右，約以 15 天為單位，可以分成插秧成活期、分蘗初期、分蘗末期、開花初期、開花末期、成熟初期、成熟中期及成熟末期等 8 個不同的生長週期，如表 2.1 所示(鍾，2004)。在上述各試驗分期中，水稻體在各別生長期皆有不同之生長特性，如在分蘗末期之水稻莖桿已發育成熟且完成分枝，而在開花末期之時，水稻穗皆以長出等。因此，本研究在水稻體阻水效應現地試驗中是以台梗十一號(俗稱蓬萊米)為試驗品種，水稻植株樣本分別採取生長特性具明顯差異之分蘗末期、開花末期、成熟初期及成熟中期為第一期至第四期之試驗對象。

2.2 水稻基本物理特性

在台灣地區，農民為確保水稻有豐碩的收

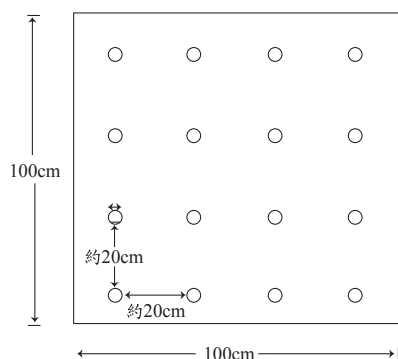


圖 2.1 單位面積田間之植株排列示意圖(n , plants numbers/ m^2)

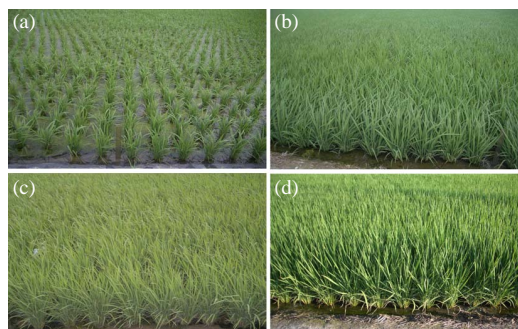


圖 2.2 水稻田間植株排列狀況(a)第一期(分蘗末期)，(b)第二期(開花末期)，(c)第三期(成熟初期)，(d)第四期(成熟中期)試驗

成，於插秧時會以 20 公分長為間隔，將 6~8 棵秧苗集中種植，每一顆秧苗可能再分蘗 3~4 之分蘗數，而分蘗後之集體生長的水稻稱為株。以單位面積之水田區為例，依此方式進行水稻種植，則可種植的水稻株數約為 16 株/ m^2 ，如圖 2.1 所示。在本研究中，四個試驗分期之水稻植株於田間的排列如圖 2.2(a)至(d)所示以瞭解田間現地狀況，而水稻之基本物理特性如單株水稻底部平均直徑與平均株高等，其詳細內容則可參考表 2.2 所示。

2.3 影像分析方法分段量測水稻迎水面積及試驗流程

圖 2.3 是為拍攝水稻迎水面積影像之 RGB

表 2.2 試驗分期之水稻生長週期物理特性

試驗分期	株高範圍(h_p)	單株底部直徑範圍(d)	平均株高	單株底部平均直徑
第一期(分蘗末期)	30.0~38.0	4.5~5.6	35.0	5.0
第二期(開花末期)	55.0~62.0	5.0~10.0	60.0	7.5
第三期(成熟初期)	65.0~72.0	8.0~12.0	70.0	10.0
第四期(成熟中期)	90.0~100.0	10.0~15.0	95.0	12.5

單位：cm



圖 2.3 水稻迎水面積影像之 RGB 全彩圖檔



圖 2.5 依植株的高度裁剪若干斷面影像



圖 2.4 背景淡化後的 8 位元灰階圖檔

全彩(24-bit color)圖檔。首先，將全彩圖檔調整對比度、明亮度及方格紙背景淡化，接著再轉換全彩圖檔成爲 8 位元灰階(8-bit grayscale)圖檔，如圖 2.4 所示。最後，再將已轉成 8 位元灰階之圖檔，依水稻植株高度裁剪成間距爲 5 公分之若干斷面影像，以便於試驗中分段量測水稻植株之迎水面積，如圖 2.5 所示。在影像分析方法中，8 位元灰階的圖檔呈現 2^8 階的灰階層次，灰階值

由 0 到 255 的變化，等於顏色由黑至白的分布。分析植株灰階值較小之顏色較深區域分佈，當分析圖檔中灰階值小於可識別之色差門檻值時，其深色區域像數佔全圖檔像數的百分比爲 $p\%$ 。計算各分區圖檔的全部面積爲 $A(z)$ ，則可由(1)式得到水稻植株之迎水面積 $A_f(z)$ 之大小。

$$A_f(z) = A(z) \times p \% \dots\dots\dots(1)$$

2.4 水稻阻水效應參數

水田區在洪水來臨之時，其內所種植的水稻植株對於水流產生了阻水效應，其阻水參數包括田間水稻種植排列方式所形成之水稻植株的密度因子(a)及水稻植株對水流產生之阻力係數(C_D)等。本研究係根據 Nepf 及 Vivoni 於 2000 年實驗中定義水稻植株的密度因子(canopy density, a)如下式：

$$a(z) = n \frac{A_f(z)}{\Delta z} \dots\dots\dots(2)$$

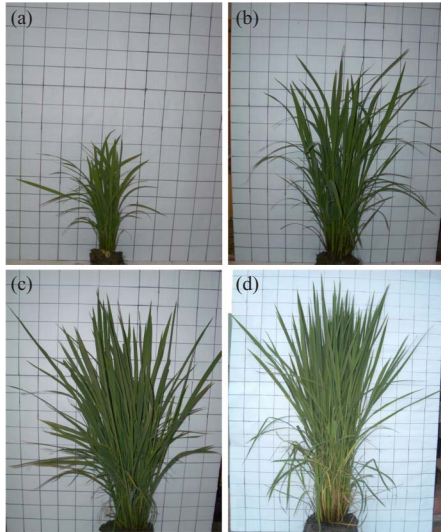


圖 2.6 單株水稻迎面影像 (a)第一期，(b)第二期，(c)第三期，(d)第四期 試驗

式中 n 為單位面積所種植的水稻株數(plant numbers/m²)， $A_f(z)/\Delta z$ 為每一固定間距水流通過單株水稻之迎水面積。另外，Nepf 在 1999 年進行尾流干擾模式(wake interference model)實驗中，發現水流通過植栽所產生的阻力係數(C_D)分佈與水稻植株密度因子(a)及其底部直徑(d)兩者密切相關。Mudd 及 Furbish (2002)參考其資料，並進行多次不同植栽的阻力係數實驗後，由實驗數據迴歸得到 C_D 值分佈與 a 及 d 之關係，其迴歸式如下：

$$C_D = 1.1702e^{-8.2636(ad)} \dots\dots\dots(3)$$

在本研究中採用上列之阻力係數迴歸式，並利用 2.2 節及 2.3 節所述之試驗方法與現地試驗量測資料代入(2)式中，計算現地田間的水稻植株密度因子後，再搭配各試驗分期中水稻之底部直徑進行 C_D 值分佈之計算。

然而，當洪水進入水田區時，水稻植栽帶阻滯洪水的流動過程並不能以水稻植株的密度因子或阻力係數之單一參數可評估。本研究根據 Nepf 及 Vivoni(2000)提出水稻植栽帶所產生的阻水係數觀念，並定義其為水稻植株的密度因子與阻力係數之乘積值(即阻水係數等於 $C_D a$)，以完

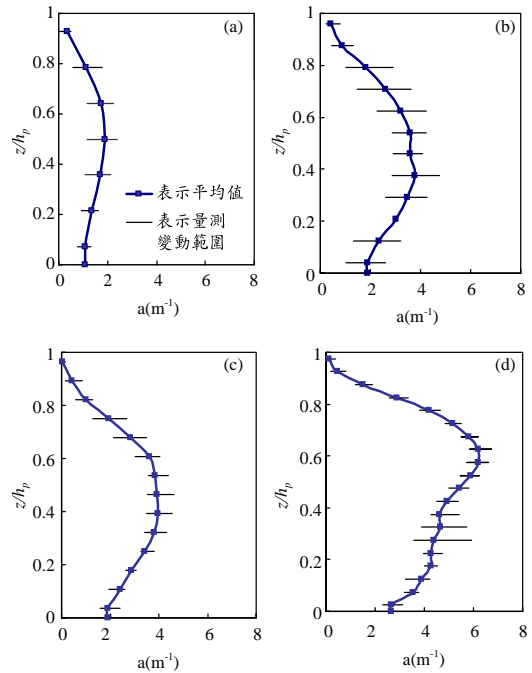


圖 2.7 水稻密度因子高度分佈曲線 (a)第一期($hp = 35\text{cm}$)，(b)第二期($hp = 60\text{cm}$)，(c)第三期($hp = 70\text{cm}$)，(d)第四期($hp = 95\text{cm}$) 試驗

整地描述水田區內水稻植栽帶所能提供之阻水效應大小。

2.5 試驗結果與分析

圖 2.6(a)至(d)分別為試驗研究第一期至第四期之單株水稻影像，利用 2.3 節所述之試驗流程，將各試驗分期植株的迎水面積測量出來，搭配(2)及(3)式求出水稻植株密度因子、阻力係數及阻水係數，其結果整理如表 2.3 至表 2.6 所示。在試驗結果中，圖 2.7(a)至(d)呈現四個試驗分期中，水稻於 0.6 倍株高處(由水稻植株底部向上)出現密度因子最大值，其原因是在此高處之分蘗數最多、枝葉最繁雜，使得量測出來的植株分段迎水面積最大所造成的。

由圖 2.7 與圖 2.8 中發現水稻植株密度因子分佈與阻力係數呈現負相關，即在水稻植株約為 0.6 倍高處產生阻力係數之極小值，而在水稻植株頂端卻出現極大值。造成上述之現象產生則是

表 2.3 第一期(分蘖末期)之阻水效應參數分析

間距 Δz (cm)	密度因子 a (m^{-1})	阻力係數 C_D	阻水係數 $C_D * a$ (m^{-1})
0~5	1.0877	0.7466	0.8121
5~10	1.3616	0.6667	0.9078
10~15	1.6936	0.5812	0.9844
15~20	1.9106	0.5314	1.0153
20~25	1.7581	0.5660	0.9950
25~30	1.1334	0.7326	0.8304
30~35	0.3557	1.0103	0.3593

表 2.4 第二期(開花末期)之阻水效應參數分析

間距 Δz (cm)	密度因子 a (m^{-1})	阻力係數 C_D	阻水係數 $C_D * a$ (m^{-1})
0~5	1.8717	0.3668	0.6866
5~10	2.3211	0.2777	0.6445
10~15	3.0006	0.1822	0.5468
15~20	3.4555	0.1375	0.4750
20~25	3.7586	0.1139	0.4282
25~30	3.5782	0.1274	0.4558
30~35	3.5942	0.1261	0.4533
35~40	3.2238	0.1587	0.5116
40~45	2.6197	0.2307	0.6045
45~50	1.7962	0.3844	0.6905
50~55	0.8699	0.6825	0.5937
55~60	0.4328	0.8949	0.3873

表 2.5 第三期(成熟初期)之阻水效應參數分析

間距 Δz (cm)	密度因子 a (m^{-1})	阻力係數 C_D	阻水係數 $C_D * a$ (m^{-1})
0~5	1.9072	0.2420	0.4615
5~10	2.3941	0.1618	0.3874
10~15	2.8633	0.1098	0.3144
15~20	3.4116	0.0698	0.2382
20~25	3.8062	0.0504	0.1918
25~30	3.9668	0.0441	0.1750
30~35	3.9196	0.0459	0.1798
35~40	3.8436	0.0489	0.1878
40~45	3.5959	0.0599	0.2156
45~50	2.8478	0.1112	0.3168
50~55	1.9500	0.2336	0.4555
55~60	1.0117	0.5072	0.5131
60~65	0.4331	0.8182	0.3543
65~70	0.0570	1.1163	0.0637

表 2.6 第四期(成熟中期)之阻水效應參數分析

間距 Δz (cm)	密度因子 a (m^{-1})	阻力係數 C_D	阻水係數 $C_D * a$ (m^{-1})
0~5	2.6584	0.0751	0.1997
5~10	3.5264	0.0306	0.1081
10~15	3.8768	0.0213	0.0827
15~20	4.2776	0.0141	0.0603
20~25	4.2848	0.0140	0.0600
25~30	4.3840	0.0126	0.0554
30~35	4.6416	0.0097	0.0449
35~40	4.6272	0.0098	0.0455
40~45	4.9344	0.0072	0.0353
45~50	5.4368	0.0043	0.0232
50~55	5.8704	0.0027	0.0160
55~60	6.1792	0.0020	0.0122
60~65	6.2112	0.0019	0.0119
65~70	5.8208	0.0029	0.0167
70~75	5.1408	0.0058	0.0297
75~80	4.1776	0.0156	0.0653
80~85	2.8976	0.0587	0.1700
85~90	1.4944	0.2500	0.3735
90~95	0.4768	0.7151	0.3410
95~100	0.1120	1.0316	0.1259

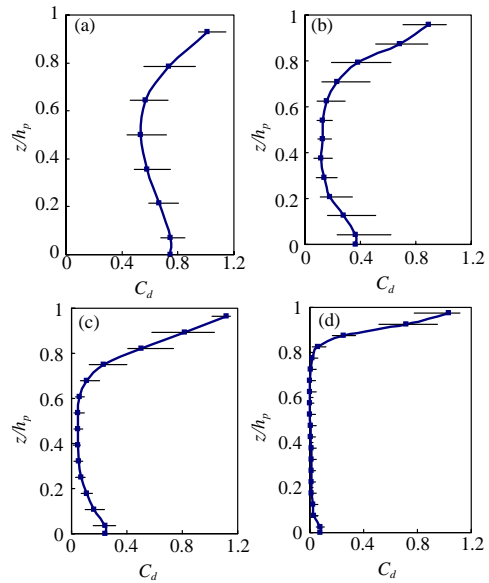


圖 2.8 阻力係數高度分佈曲線圖(a)第一期, (b)第二期, (c)第三期, (d)第四期試驗

因為水稻植株密度因子與水稻迎水面積大小成正比，而阻力係數則是與水稻種植排列密切相關。因此，水稻植株密度因子曲線與阻力係數曲線的趨勢走向相反，並且在水稻生長期愈接近成熟期時，兩者間的差異就愈明顯不同。

本研究根據試驗結果，分析水田區在不同生長時期所提供的阻水係數，進行陸續的水田區調

洪減災量化模式之模擬。由圖 2.9(a)至(d)的阻水係數高度分佈曲線中可看出，第一期試驗至第四期試驗之平均阻水係數分別為 0.6、0.5、0.3 及 0.1。本研究試驗結果指出，當生長期愈長之水稻植株，其產生的阻水係數則愈變小。

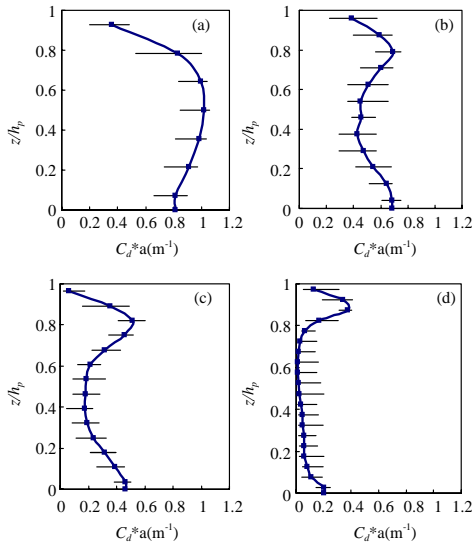


圖 2.9 阻水係數高度分佈曲線 (a)第一期, (b)第二期, (c)第三期, (d)第四期試驗

三、三維度水田區調洪減災量化模式

三維度自由液面植栽帶水流受到植栽阻礙 (plant blockage)、底床剪力 (bed shear)、自由液面 (free surface)、尾流 (wake) 現象與流體速度梯度 (velocity gradient) 等因素影響, 使流場多為複雜的紊流場。在模式中, 需加入紊流模式提升植栽帶水理分析的準確度, 而且在自由液面中, 空氣和水兩種介質的性質不同會導致自由液面產生阻滯效應 (damping effect)。因此, 本研究採用 $k-\varepsilon$ 紊流模式及體積分率法 (volume of fluid technique) 模擬自由液面紊流場, 而靠近底床附近的邊界流場則使用邊牆函數 (wall function) 處理求解, 以達到較佳的模擬結果。

3.1 $k-\varepsilon$ 紊流模式

$k-\varepsilon$ 紊流模式是一種加入求解紊流動能及動能消散率的半經驗模式 (Launder 及 Spalding, 1974)。在三維流場中有 7 個控制方程式, 包括時間平均之連續方程式、動量方程式、紊流動能及動能消散率控制方程式, 而紊流黏滯係數 (ν_T) 為紊流動能 (k) 及動能消散率 (ε) 的函數。求解七個未知數 (包括 3 個方向之平均流速 \bar{u}_i 、平均壓

力 \bar{P} 、 k 、 ε 及 ν_T)。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu_T \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu_T \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}) + \frac{F_i}{\rho} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{c_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$+ \nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{c_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$+ c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (8)$$

其中, 上列各模式常數 $c_\mu = 0.09$ 、 $c_{1\varepsilon} = 1.44$ 、 $c_{2\varepsilon} = 1.92$ 、 $c_k = 1.0$ 、 $c_\varepsilon = 1.3$ 皆是模式計算結果與實驗數據驗證而得 (Adams 及 Rodi, 1990)。

本研究中, 將幾何形狀難以描述的水稻植栽帶視為孔隙介質 (porous media)。因此, 在動量守恆方程式中, 本研究加入動量損失項 F_i 來表現流體受到孔隙介質的阻擋效應, 則可避免處理複雜幾何形狀的困難 (Wilson, 1985), 其 F_i 表示如下:

$$F_i = -\frac{1}{2} \rho C_D a \bar{u}_i \bar{u}_{mag} \quad \dots\dots\dots (9)$$

其中, C_D 代表孔隙介質阻力係數 (drag coefficient), a 為孔隙介質面積密度 (即單位體積內的孔隙介質面積), \bar{u}_{mag} 代表水流速度強度 ($\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}$) 為一純量, $C_D a$ 為阻水係數 (即單位長度的動量損失係數), 其因次為 m^{-1} 。本研究根據水稻植栽阻水效應參數之現地量測試驗, 將試驗結果得到的阻水係數 $C_D a$ 值代入上式進行模擬, 以求符合台灣地區水田所提供阻水效應之現地狀況。

3.2 體積分率法

在三維度自由液面植栽帶流場的模擬中，處理自由液面問題需配合體積分率法以計算空氣及水兩種不同介質的二相(two phase)流場。空氣及水的物理性質透過體積分率，在控制體積內水的體積分率(F)定義(Hirt 及 Nichols, 1981)，如(10)式所示。

$$F = \frac{\delta \Omega_{water}}{\delta \Omega_{cell}} \dots\dots\dots(10)$$

其中， $\delta \Omega_{cell}$ 為控制體積大小； $\delta \Omega_{water}$ 為控制體積內水的體積。因此，當 $F=1$ 時，控制體積內充滿水； $F=0$ 時，控制體積內充滿空氣； $0 < F < 1$ 時，代表在這個控制體積內包含自由液面。利用體積分率法處理自由液面邊界，可避免複雜的邊界設定。

在體積分率法中，空氣及水的流場控制方程式之形式相同，只需個別帶入兩種介質不同的物理性質(如(11)及(12)式所示)於控制方程式求解。

$$\rho = F\rho_{water} + (1-F)\rho_{air} \dots\dots\dots(11)$$

$$\mu = F\mu_{water} + (1-F)\mu_{air} \dots\dots\dots(12)$$

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

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots(13)$$

經過數值求解(13)式，可得到計算域中水及空氣兩種流體之物理量，包括紊流動能及動能消散率等。

3.3 底床邊界與邊牆函數

$k-\varepsilon$ 紊流模式雖可以利用於計算非均質性紊流，但不適用於非等向性紊流。在靠近底床邊界處，垂直於邊壁之紊流速度受到抑制而變小，水平方向上之紊流速度較不受影響。故在計算靠近底床邊界處使用邊牆函數，降低非等向性紊流的影響以貼近實際流場。在靠近底床

$z = z_{bed}$ 處：

$$U(z_{bed}) = u_* \left[\frac{1}{\kappa} \ln z_{bed}^+ + A \right] \dots\dots\dots(14)$$

(14) 式中， $z_{bed}^+ = z_{bed} u_* / \nu$ ，摩擦速度 $u_* = c_\mu^{1/4} k_{bed}^{1/2}$ ， k_{bed} 為在 z_{bed} 處的紊流動能。

3.4 數值方法

在三維度自由液面配合孔隙介質流場的模擬中，由於可移動邊界條件複雜、網格切割困難、傳輸方程式疊代誤差大，且耗費龐大的電腦運算資源及數值計算繁複等因素。綜合評估上述各項因素後，本研究採用計算流體力學軟體 Fluent 中已發展的基本程式模組，再搭配自行撰寫程式碼代入使用者自訂函數(User Defined Function, UDF)，並修正邊界條件及設定阻力係數等。最後，再自行撰寫自定場函數(custom field function)定義自由液面界面，以分離本二相流場之空氣及水的物理量。

四、模式驗證

Nepf 及 Vivoni (2000)把植物和水深的關係分成突出的(emergent)、完全沒入的(submerged)及介於上述兩者之間的過渡類型等三種，並且實作生態流體力學實驗。實驗中以七組不同水深條件與植栽高度的比值(z/h_p)，分別為 1.0、1.25、1.50、1.75、1.90、2.15 及 2.75，其流場之雷諾數介於 4000~40000，分析水流通過植栽帶時之平均流場分佈和紊流結構分佈。根據其實驗數據，本研究的模式驗證部分，分成植栽高度大於水深(水深比為 2.75)之第一種類型植栽及植栽高度小於水深為第二種類型(水深比為 1.0)進行模式驗證。

4.1 實驗架構介紹

Nepf 及 Vivoni 在 2000 年所使用的實驗水槽長 24m、寬 0.38m，於入流 3m 處開始鋪設長 7.4m、高 0.16m 的植栽帶，其實驗架構如圖 4.1 所示。第一種類型植栽所對應之初始條件之水深高為 0.44m，入流速度為 0.09ms^{-1} ，其雷諾數以水深為特性長度，其值約在 40000 左右；第二種

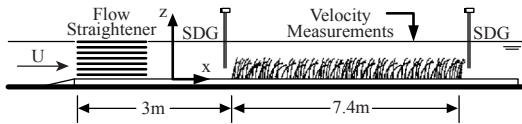


圖 4.1 實驗架構(圖取自 Nepf 及 Vivoni, 2000)

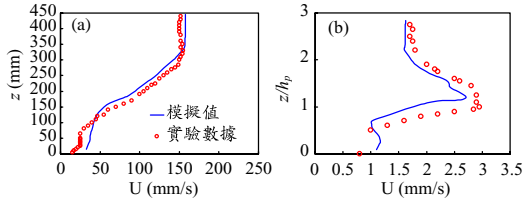


圖 4.2 (a)平均速度, (b)紊流方均根速度之垂直剖面(水深比 2.75)

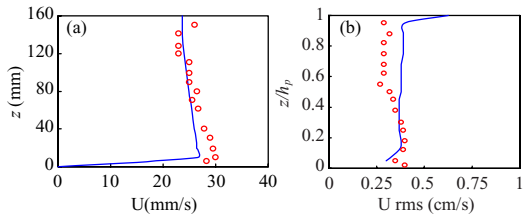


圖 4.3 (a)平均速度, (b)紊流方均根速度之垂直剖面(水深比 1.0)

類型植栽和水深的關係是為完全沒入，對應之水深高為 0.16m，入流速度等於 0.025ms^{-1} ，流場之雷諾數約為 4000。

4.2 三維度水田區調洪減災量化模式驗證

本研究採用 $k-\epsilon$ 紊流模式搭配孔隙介質流場之動量扣減項的阻水係數理論，模擬水流通過植栽帶時之流場分佈和紊流結構。在模擬結果與實驗數據兩者的關係比較中，圖 4.2(a)及(b)為第一種類型植栽之時間平均速度(U)及紊流方均根速度(U_{rms})之垂直剖面圖，顯示採用的研究模式在時間平均速度場部分的模擬結果與實驗數據近似外，含孔隙介質流場的紊流方均根速度也呈現一致性。第二種類型植栽如圖 4.3(a)及(b)所示，結果亦呈現良好的吻合性。在模式驗證後，本研究以三維度災量化分析模式與試驗研究者並進之方式，進行水田區調洪減災生態功能之

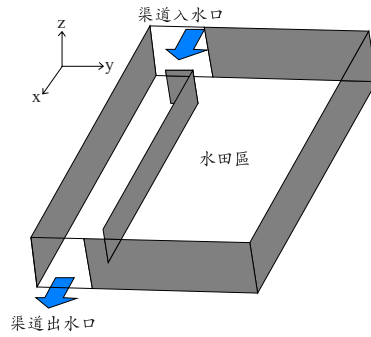


圖 5.1 單坵塊水田區示意圖

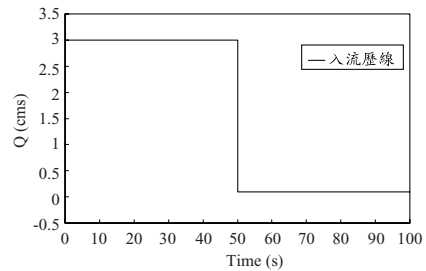


圖 5.2 渠道入口之入流歷線

水利分析與問題探討。

五、結果與討論

5.1 研究案例介紹

本文之目的為探討水田區調洪減災之生態功能，故在以下之水田區坵塊研究案例中，其設計之入流量是用以模擬水田區及其附屬排水渠道在遭遇大量洪水來襲之時，水田區所提供的蓄洪、滯洪等效果，而非單以水田區內的田間排水操作為研究項目。本研究針對一長 40m、寬 10m、田埂高度為 40cm 及坡度為 1/200 之單坵塊水田區，入流、出流面積皆為 1m^2 大小且入流流量等於 3CMS 之渠道，如圖 5.1 及圖 5.2 所示，進行水田區植栽帶三維度自由液面流場數值模擬。洪水經由渠道進入水田區，受到水田區內水稻的阻水效應，提供調滯洪水功能。在研究案例中，分別針對高度為 10cm、20cm、30cm 與 40cm 之水稻進行模擬，比較不同高度之水稻對其調滯洪水效果差異。由於田埂高度為 40cm，則水田區內最高蓄水深為 40cm，水位高於 40cm 則洪水會從

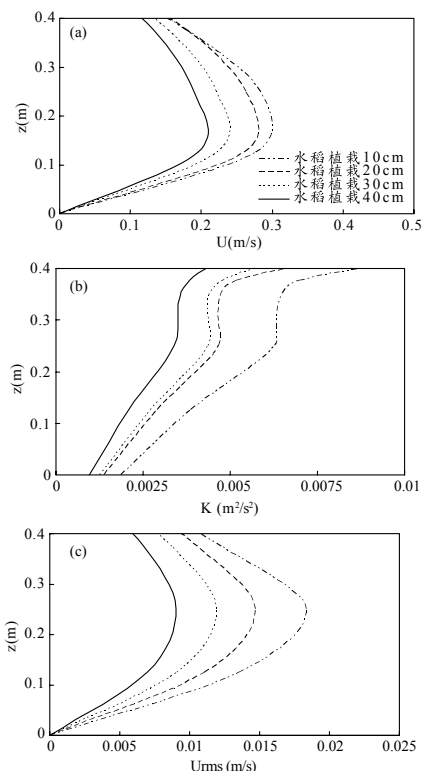


圖 5.3 水田區內不同高度水稻植栽帶(a)平均速度, (b)紊流動能, (c)紊流方均根速度之垂直剖線

田埂溢流回渠道內, 因此水稻體阻水效應的有效高度為 40cm。此外, 亦對水田區內無水稻案例(水田區休耕時期)進行模擬, 以評估水稻降低洪峰流量之效果。

最後, 必須強調的是本文係以模式發展及理論應用為主軸, 做為水田區調洪減災生態功能量化分析之學理研究。針對台灣水田區之調洪減災的實例及其功能價值, 本研究目前正配合農委會選擇八年八百億水利工程計畫之區域, 執行水田區調洪減災之實例研究, 未來會陸續的投稿發表此一課題。

5.2 模擬結果

在水田區內水稻植栽不同生長時期之阻水效應, 可降低洪水之流速, 由圖 5.3(a)可看出水田內植株高度為 40cm 之平均洪水流速約為

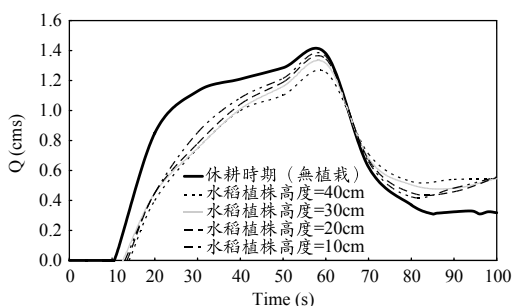


圖 5.4 渠道出口之出流歷線

10cm 高水稻植株的 0.67 倍。再者由圖 5.3(b)及(c)亦可以發現洪水進入水田區時, 水稻植栽帶宛如提供層層的防護網而產生阻滯效應, 使得水流的動能及紊流速度之消散程度隨著水稻植株高度愈高而影響更為顯著。

當水稻植栽之阻水效應越大時, 降低洪峰流量效果越顯著, 所以從圖 5.4 之渠道中洪水出流歷線模擬結可得知在 10cm、20cm、30cm 及 40cm 等不同水稻植株高度下, 對照無水稻植栽休耕時期, 可降低洪峰流量約為 2%、3%、5%及 10%。因此, 降低洪峰流量與水稻植株高度呈現正相關。另外, 根據質量守恆觀點(亦即入流量必須等於出流量), 水田區內之水稻植栽除了可以有效降低洪峰流量之外, 亦可使得洪峰過後的低流量較休耕時期案例為高, 而重新分配渠道內之出流歷線, 如圖 5.4 所示。圖 5.5(a)至(d)為四個不同生長高度案例在座標 $y=4m$ 垂直剖面處之水位剖線示意圖, 圖中顯示水田區內水稻植株生長高度愈高, 則水田區內阻水高度增加, 形成明顯的阻水效應。因此, 當洪水由渠道流入水田區時, 其運動方式會呈現緩慢而趨於停滯, 導致洪水流量將延遲時間再次流入渠道中, 而降低下游的排水尖峰流量, 宛如人工濕地。足證水稻田可提供良好的調滯洪水等功能。

六、結 論

本研究針對水田區調洪減災生態功能, 以三維度量分析與試驗研究二者並進之方式, 研析水稻田對於調滯洪水及渠道下游出口流量之影響, 其研究結果總結如下:

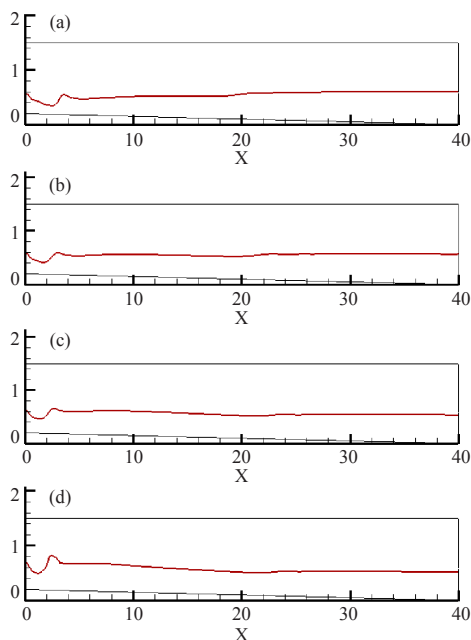


圖 5.5 水稻植株高度為(a) 10cm，(b) 20cm，(c) 30cm，(d) 40cm 之水位剖面(y=4.0m, t=50s)

1. 含水稻植栽水田區較休耕期間，具有較佳的調滯洪水功能。
2. 當水流流入水田區時，水稻植栽帶宛如提供層層的防護網，對於洪水產生阻滯效應，使得水流的動能及紊流速度之消散程度，隨著水稻植株高度愈高而影響愈為顯著。洪水由渠道進入水田區後，其運動方式呈現緩慢、停滯的現象，特別是在植株高的水田區域。
3. 在 10~40cm 不同水稻植株高度對照休耕時期下，約可降低洪峰流量約為 2%~10%，其結果可推論降低洪峰流量與水稻植株高度呈現正相關。
4. 水稻植株減緩洪水流速，形成水田區內蓄水高度上升，使得大量的洪水被調滯於水田區內，而延緩洪水流出水田區。等待洪峰時期過後，調滯於水田區的洪水流量將隨著時間慢慢地流入渠道，而重新分配渠道內出流歷線，其功能宛如人工濕地。

謝 致

本文研究成果承行政院農業委員會農田水利處經費補助乃得以完成，研究期間並獲蔡處長明華、林科長尉濤及林技正國華提供寶貴意見與資料，謹致謝忱。

參考文獻

1. 鍾菡歆，2004。「作物倒伏風險之生物力學模擬與風洞試驗研究」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
2. Adams, E.W. and Rodi, W., 1990. Modeling flow and mixing in sedimentation tanks. *J. Hydr. Engrg.*, Vol. 116, No. 7, 895-913.
3. Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free surface boundaries. *J. Comput. Phys.*, 201-225.
4. Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974. The numerical computation of turbulent flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 269-289.
5. Mudd, S.M. and Furbish, D.J., 2002. Feedbacks between flow, sedimentation, and standing biomass on salt-marsh platforms. *Fall Meet. Suppl., EOS Trans.*, Vol. 83, No. 47, Abstract H52A-0847.
6. Nepf, H.M., 1999. Drag turbulence and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Res.*, Vol. 35, No. 2, pp. 479-489.
7. Nepf, H.M. and Vivoni, E.R., 2000. Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *Geophy. Res.*, Vol. 105, No. 12, 547-557.
8. Wilson, J.D., 1985. Numerical studies of flow through a windbreak. *J. of Wind Engrg. And Ind. Aerodyn.*, Vol. 21, 119-154.

收稿日期：民國 95 年 9 月 15 日
 修正日期：民國 95 年 10 月 13 日
 接受日期：民國 95 年 10 月 17 日