

臺北市強降雨即時淹水預報平台之精進研發 —熱啟動技術連續運行之應用

ENHANCEMENT OF REAL-TIME FLOOD INUNDATION FORECASTING PLATFORM IN TAIPEI CITY - APPLICATION OF HOT-START MECHANISM ON CONTINUOUS INUNDATION MODELING

國立臺灣大學
氣候天氣災害研究中心
助理研究員

王 嘉 和
Chia-Ho Wang

國立臺灣大學
水工試驗所
研究專員

王 嘉 瑜
Jia-Yu Wang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士後研究員

游 翔 麟
Hsiang-Lin Yu

國立臺灣大學
水工試驗所
研究專員

曾 千 瑜
Chien-Yu Tseng

臺北市府工務局
水利工程處
總工程司

張 凱 堯
Kai-Yao Chang

臺北市府
工務局
局長

林 志 峯
Chih-Feng Lin

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

張 倉 榮*
Tsang-Jung Chang

摘 要

近年來都市地區積淹水多為短延時強降雨暴雨所造成，此些強降雨於短時間內形成過量之逕流量造成排水系統無法負荷，因而產生積淹水現象。為了縮短淹水模擬所需時間以及減少重複計算，並可以結合地表、雨水下水道初始流況，同時利用每 10 分鐘更新的 QPESUMS 降雨預報進行淹水預報，因此，本研究因此更新臺大細胞自動機快速淹水模式 (NTU-CAFIM) 並研發熱啟動技術 (Hot-start Module)，利用每次模擬時所產製的熱啟動文件 (Hot Start File) 進行即時淹水模擬的資料暫存，其資料包含地表以及雨水下水道流況 (水位、流速)，同時結合 QPESUMS 降雨預報進行未來 2 小時的淹水預報，以此方式進行每 10 分鐘更新頻率的熱啟動文件 (Hot Start File) 暫存與淹水預報發布，讓原先每 30 分鐘更新的未來 2 小時淹水預報精進為每 10 分鐘更新。以臺北市 2021 年 0604 豪雨事件進行熱啟動模式測試之結果，熱啟動模式能提供與非熱啟動模式幾乎完全一樣的淹水預報結果，然而僅需後者的 39 % 的計算時間。

關鍵詞：即時淹水模擬、細胞自動機、雨水下水道、熱啟動、淹水預報。

* 通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系教授
10617 台北市羅斯福路四段 1 號，tjchang@ntu.edu.tw

ENHANCEMENT OF REAL-TIME FLOOD INUNDATION FORECASTING PLATFORM IN TAIPEI CITY - APPLICATION OF HOT-START MECHANISM ON CONTINUOUS INUNDATION MODELING

Chia-Ho Wang

National Taiwan University
Center for weather Climate and
Disaster Research

Jia-Yu Wang

National Taiwan University
Hydrotech Research Institute

Hsiang-Lin Yu

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

Chien-Yu Tseng

National Taiwan
University
Hydrotech Research
Institute

Kai-Yao Chang

Taipei City
Government
Public Works
Department

Chih-Feng Lin

Taipei City
Government
Public Works
Department

Tsang-Jung Chang*

National Taiwan
University
Department of
Bioenvironmental
Systems Engineering

ABSTRACT

Recently, urban floodings in Taipei city are mainly attributed to short-duration high-intensity rainfalls that drop massive water volume in a considerably short duration and result in excess runoffs beyond the capacity of drainage systems. For this situation, the Taipei City Government and the research team of the National Taiwan University worked together to establish a real-time flood inundation forecasting platform based on the developed National Taiwan University Cellular Automata Flood Inundation Model (NTU-CAFIM) of the research team. The platform sequentially and automatically conducts 2-hour urban flood forecasting in a 30-min frequency, and each flood inundation simulation comprises 4-hour observed rainfall and 2-hour forecasted rainfall by QPESUMS. To further increase the efficiency without losing the required accuracy of the platform, for each simulation, the 4-hour observed rainfall is replaced with the settings of initial conditions for the NTU-CAFIM and the 10-min observed rainfall. Correspondingly, the overland flow model (OFM) and the sewer flow model (SFM) of the NTU-CAFIM are both modified to incorporate the hot-start module to accomplish this task. At the beginning of a simulation, OFM and SFM (*i.e.*, the SWMM) both read the formatted hot-start files that come from the previous simulation to set their initial conditions (*i.e.*, water depths and water velocities). As the simulation time reaches the end of the 10-min observed rainfall, OFM and SFM both save the water depths and velocities at this time into their formatted hot-start files for the subsequent simulation. In this way, the frequency of the flood inundation simulation is shortened from 30 minutes to 10 minutes, which greatly enlarges the efficiency of the developed platform and more detailed measured data can be input into the simulation. The accuracy and efficiency of the advanced platform are evaluated and compared with the original platform through the 4 June 2021 extremely heavy rainfall event in Taipei. From the

results, the advanced platform only takes 39% computational time of the original platform to perform the flood inundation simulation with almost the same accuracy as the original platform, which is a remarkable improvement.

Keywords: Real-time flood inundation modeling, Cellular automata, SWMM, Hot Start, Flood inundation forecasting platform.

一、前言

近年東亞地區短延時強降雨事件頻傳，如韓國 2019 年米塔颱風在蔚金郡 (울진) 於 10 月 2~3 日造成時雨量 104.5 毫米；如日本 2020 年 6 月 6 日在埼玉縣熊谷測得 10 分鐘雨量 55 毫米、6 月 8 日在沖繩縣石垣島測得時雨量 122.5 毫米；臺灣 2018 年高雄雨量站 8 月 23 日時雨量 109 毫米、2019 年 7 月 22 日大安森林公園站時雨量 136.5 毫米、2021 年 6 月 4 日福州站時雨量 137.5 毫米等，此些強降雨均嚴峻考驗都會區排水設施的排水能力，其中以臺北市的 2021 年 6 月 4 日之暴雨特別艱困，此次暴雨造成臺北市信義區、松山區多處淹水，其中 30 分鐘雨量超過 70 毫米的雨量站有四獸 (86.5 毫米)、福州 (84.5 毫米)、挹翠 (77.5 毫米)、信義 (76.5 毫米)、瑠公國小 (75.5 毫米)、三興國小 (75 毫米)、市政中心 (73 毫米)、九如里 (70 毫米)。

學者們為了能更準確地反映出實際淹水情況，將二維漫地流模式及一維雨水下水道模式進行銜接，並利用過去的淹水事件進行評估淹水模式的正確性，如 Hsu *et al.* (2000) 與陳宣宏 (2002) 等以二維漫地流模式結合雨水下水道進行 1998 年瑞伯颱風、2001 年納莉颱風都會區積淹水評估，而 Chang *et al.* (2015、2018) 除了結合二維漫地流模式與雨水下水道之外，亦再依照土地利用、土地覆蓋來將建築物之雨水直接導入排水系統之中，於 2015 年文章中利用 4 場歷史事件 (2 場暴雨、2 場颱風) 進行評估，而 2018 年文章中利用 3 場歷史事件 (1 場颱風、2 場暴雨) 來分析，並增加了側溝與連接管於模式之中，藉此增加了積淹水評估之準確性。

熱啟動文件 (Hot-start Files) 於美國環保署暴雨經理模式 (Storm Water Management Model, SWMM) 已經應用多年，其功用主要是為了將上次模擬的結果作為下次模擬的初始條件，並同時更新下次模擬的水文條件 (邊界條件) 已進行連續模擬，當初主要是為了讓下水道從無水狀態，進入較為合理的水位狀態再輸入模擬，並可以藉使此方式測試不同水文條件下，可能造成的影響，並可以藉由觀測與預報資料進行即時更新與預估。

而現行臺灣針對短延時強降雨預報以雷達定量降水預報較有可預報性，並以每 10 分鐘推估未來 1~3 小時可能的降雨情況，本研究為了利用即時觀測與預報資料進行未來積淹水評估，並配合相關觀測與預報資料更新進行即時模擬，因此本團隊將臺大細胞自動機

快速淹水模式 (National Taiwan University Cellular Automata Flood Inundation Model, NTU-CAFIM) (王等, 2021 年) 開發熱啟動模組 (Hot-start Model)，用以儲存與利用模擬當下的各種水體狀況，包含地表漫地流與雨水下水道的水深、流速、流向等資訊，並作為下次模擬的初始條件，配合預報雨量進行向前進行積淹水模擬預報。

二、研究方法

本研究為進行即時都會區積淹水評估 (王等, 2021 年)，並可以結合每 10 分鐘跟新的觀測與預報雨量資料進行評估，因此將熱啟動模組將入了臺大細胞自動機快速淹水模式 (National Taiwan University Cellular Automata Flood Inundation Model, NTU-CAFIM) 模式中，而臺大細胞自動機快速淹水模式包含了二維快速漫地流模組、一維雨水下水道模組、道路進水口/連接管模組，其模式之詳細說明如以下章節。

2.1 二維快速漫地流模組

臺大細胞自動機快速淹水模式二維快速漫地流模組係以 Guidolin *et al.* (2015、2016) 的 WCA2D 模式為基礎進行精進與修正而得，並於細胞出流及水體轉換權重加入對地表曼寧糙度值之考量。其細胞間的轉換規則為近似傳統求解淺水波方程式之淹水模式的動量方程式，而鄰域細胞之類型為方形 von Neumann 型，如圖 1 所示。此模式之轉換規則如下：

首先計算各個鄰域細胞與中央細胞之水位差，若鄰域細胞水位高於中央細胞，則其水位差取為 0。接著，從水位差大於 0 之鄰域細胞水位差得到最小水位差，計算方法如下式 (1) 至式 (5) 所示。

$$\Delta l_{0,i} = l_0 - l_i \quad \forall i \in \{1 \dots m\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta V_{0,i} = A_i \cdot \max\{\Delta l_{0,i}, 0\} \quad \forall i \in \{1 \dots m\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\Delta V_{\min} = \min\left\{\Delta V_{0,i} \mid \begin{matrix} \Delta l_{0,i} > \tau \\ i=1 \dots m \end{matrix}\right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\Delta V_{\max} = \max\left\{\Delta V_{0,i} \mid i=1 \dots m\right\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\Delta V_{total} = \sum_{i=1}^m \Delta V_{0,i} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中， $\Delta l_{0,i}$ ：中心細胞與鄰近細胞之水位差；
 l_0 ：中央細胞水位 (m)；
 l_i ：第 i 個鄰域細胞水位 (m)；
 m ：鄰域細胞數量 (本研究取為 4 個)；
 A_i ：第 i 個鄰域細胞面積 (m²)；
 $\Delta V_{0,i}$ ：中央細胞和第 i 個鄰域細胞之間可傳遞體積 (m³)；
 $\Delta V_{\min}$ ：下游細胞最小可傳遞量；
 τ ：水位差容差值 (m)；
 $\Delta V_{\max}$ ：下游細胞最大可傳遞量；
 ΔV_{total} ：細胞可存儲量總和。

而下游細胞 i 的可傳遞量 $\Delta V_{0,i}$ (即離開中央細胞的總體積) 若過大，可能造成下游細胞比中央細胞更高的水位因而產生致振盪。為了盡量避免這個問題，中央細胞應該保留部分體積以確保水位高於鄰近細胞以減少震盪，而此保留體積等於最小可傳遞量，如圖 1 與圖 2 所示，即式 (6) 以及式 (7) 所示之權重。

$$w_i = \frac{\Delta V_{0,i}}{\Delta V_{\text{total}} + \Delta V_{\min}} \quad \forall i \in \{1 \dots m\} \quad (6)$$

$$w_0 = \frac{\Delta V_{\min}}{\Delta V_{\text{total}} + \Delta V_{\min}} \quad (7)$$

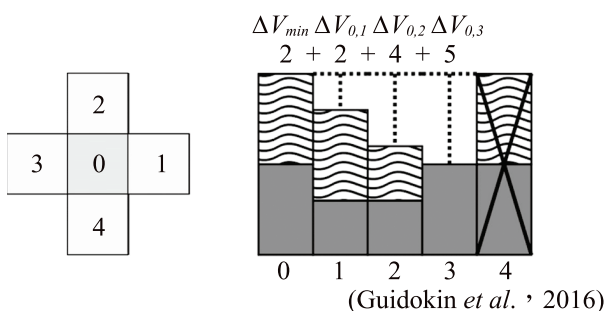


圖 1 細胞體積傳遞示意圖

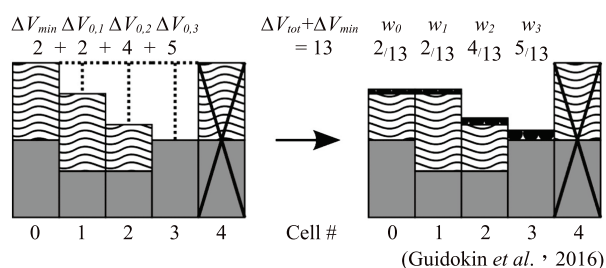


圖 2 細胞權重係數計算舉例示意圖

式中， w_i ：第 i 個鄰域細胞傳遞體積權重；
 w_0 ：中央細胞保留體積權重。

考慮到典型的方形 von Neumann 型方法，每個中心細胞往 4 個方向流動將計算臨界流況條件和曼寧公式，如式 (8) 以及式 (9)。式 (8) 以及式 (9) 計算從中央細胞到相鄰細胞的最大允許流速 $v_{\max}$ ，如式 (10) 所示。

$$v_{\text{critical}} = \sqrt{gd_0} \quad (8)$$

$$v_{\text{manning}} = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} = \frac{d_0^{2/3} \left(\frac{\Delta l_{0,i}}{\Delta x} \right)^{0.5}}{n} \quad (9)$$

$$v_{\max} = \min \left\{ \sqrt{gd_0}, \frac{d_0^{2/3} \left(\frac{\Delta l_{0,i}}{\Delta x} \right)^{0.5}}{n} \right\} \quad (10)$$

式中， v_{critical} ：臨界流速 (m/sec)；
 g ：重力加速度 (m/sec²)；
 d_0 ：中央細胞水深 (m)；
 v_{manning} ：曼寧公式流速 (m/sec)；
 R ：水力半徑 (m)；
 S ：水力梯度；
 n ：中央細胞之地表曼寧糙度值 (sec/m^{1/3})；
 $v_{\max}$ ：最大允許細胞間流速 (m/sec)；
 Δx ：中央細胞與鄰域細胞中心距離 (m)。

下一時刻 $t + \Delta t$ 從中央細胞總轉移至鄰域細胞間之水體量是以三個計算項中取一最小值，其計算如式 (11)：第一項為在當前時刻 t 中央細胞自身之水體量；第二項為最大權重係數之鄰域細胞其接收水體量 $I_{\max}$ 除以其權重係數，其中 $I_{\max}$ 可由式 (12) 計算而得；第三項為中央細胞流出可轉移水體總量的限制項，包含了中央細胞在傳出水體後不得低於任一鄰域細胞上升後之水位與上一次從中央細胞與鄰域細胞傳遞的可轉移總水體量。

$$I_{\text{total}}^{t+\Delta t} = \min \left(d_0 A_0, \frac{I_{\max}}{w_{\max}}, \Delta V_{\min} + I_{\text{total}} \right) \quad (11)$$

$$I_{\max} = v_{\max} d_0 \Delta t \Delta e_{\max} \quad (12)$$

式中， $I_{total}^{t+\Delta t}$ ：在 $t + \Delta t$ 時刻離開中央細胞的總體積 (m^3)；
 A_0 ：中央細胞面積 (m^2)；
 I_{total} ：在 t 時刻離開中央細胞的總體積 (m^3)；
 Δe_{max} ：最大權重的細胞邊緣的長度 $= \Delta x$ (m)。

最後，每個鄰域細胞之接收水體量為依式 (13) 所計算之可轉移水體總量乘以其對應的權重係數，如式 (13) 所示。

$$I_i^{t+\Delta t} = w_i I_{total}^{t+\Delta t} \quad \forall i \in \{1 \dots m\} \quad (13)$$

式中， $I_i^{t+\Delta t}$ ：第 i 個鄰域細胞於 $t+\Delta t$ 時刻之接收水體量 (m^3)。

以上為一中央細胞向鄰域細胞傳遞水體之轉換規則的步驟。當每個細胞皆完成該轉換規則後，即可更新每個細胞的水深，如式 (14) 所示 (林吉堃，2018)。

$$d_0^{t+\Delta t} = d_0^t - \frac{\sum_{i=1}^m I_i^{t+\Delta t}}{A_0} + \frac{\Delta V_0^{in}}{A_0} - \frac{\Delta V_0^{out}}{A_0} \quad (14)$$

式中， $d_0^{t+\Delta t}$ ：於 $t+\Delta t$ 時刻中央細胞水深 (m)；
 $\sum_{i=1}^m I_i^{t+\Delta t}$ ：鄰域細胞之接收水體量總和 (m^3)；
 ΔV_0^{in} ：中央細胞入流水體量 (m^3)；
 ΔV_0^{out} ：中央細胞出流水體量 (m^3)；
 A_0 ：中央細胞面積 (m^2)。

其中 ΔV_0^{in} 為中央細胞的側向入流水體量如降雨量或來自上游細胞之傳遞水體量等，而 ΔV_0^{out} 則為中央細胞之出流水體量如入滲量。

細胞間流速向量的計算如式 (15) 至式 (17) 式所示 (林吉堃，2018)：

$$v_i^{t+\Delta t} = \frac{I_{total}^{t+\Delta t}}{d_0^{t+\Delta t} \Delta e_i \Delta t} \quad \forall i \in \{1 \dots m\} \quad (15)$$

$$a = \sum_{i=1}^m v_i^{t+\Delta t} \cos \phi_i, \quad b = \sum_{i=1}^m v_i^{t+\Delta t} \sin \phi_i \quad (16)$$

$$\overline{v^{t+\Delta t}} = (r, \theta) = (\sqrt{a^2 + b^2}, \tan^{-1} \frac{b}{a}) \quad (17)$$

式中， $v_i^{t+\Delta t}$ ：中央細胞與第 i 個下游細胞間之流速 (m/sec)；

Δe_i ：第 i 個下游接收細胞邊緣長 (m)；
 a, b ：細胞間流速之水平與垂直分量 (m/sec)；
 ϕ_i ：中央細胞與第 i 個下游細胞間之相位角；
 $\overline{v^{t+\Delta t}}$ ：細胞間流速向量 (m/sec)；
 r ：合成向量之大小；
 θ ：合成向量之相位角。

為了提高模式演算效率，此模式採用自適應步長以決定各時間步長。當需要更新時間步長時，則採用由 Hunter *et al.* (2005) 提出之自適應時間步長公式與依照 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 條件來計算每個細胞邊界之最小時間步長，並選擇各細胞的最小時間步長中之最小值作為新的自適應時間步長。Hunter *et al.* (2005) 所提出之自適應步長公式以及 CFL 條件之最小時間步長公式分別為式 (18) 及式 (19)，而更新後的自適應時間步長則如式 (20)。

$$\Delta t_{Hunter} = \frac{\Delta x^2}{4} \min \left(\frac{2n}{R^{5/3}} S^{1/2} \right), \quad S > \sigma \quad (18)$$

$$\Delta t_{CFL} = \frac{\Delta x}{v^{t+\Delta t}} \quad (19)$$

$$\Delta t_{min} = \min (\Delta t_{Hunter}, \Delta t_{CFL}) \quad (20)$$

式中， Δt_{Hunter} ：Hunter 自適應時間步長 (sec)；
 Δx ：細胞間之中心距離 (m)；
 R ：水力半徑 (m)；
 S ：水面坡度；
 σ ：斜率容差值；
 Δt_{min} ：細胞之最小時間步長 (sec)；
 Δt_{CFL} ：CFL 條件之最小時間步長 (sec)。

而上述式 (18) 之水力半徑 R 則是由式 (21) 計算，其為中央細胞與及鄰域細胞間較高水位與較高地表高度之差值。

$$R = \max (l_0^t - l_i^t) - \max (z_0 - z_i) \quad (21)$$

式中， l_0^t ：中央細胞水位 (m)；
 l_i^t ：第 i 個鄰域細胞水位 (m)；
 z_0 ：中央細胞地表高程 (m)；
 z_i ：第 i 個鄰域細胞地表高程 (m)。

從式 (18) 之自適應時間步長計算發現，當網格大小減半時，時間步長也會隨其之二次方減少。除此之外，如 Hunter *et al.* (2005) 所提出之觀察，若兩個網格之間的水面坡度趨於零時，該時間步長也會趨於零，為了避免此情況導致演算時間急劇增加，透過設置斜率容差值 (slope tolerance) 以防止在式 (18) 所得之自適應時間步長過小的問題發生。而斜率容差值之建議值為以上升百分比 (percent of rise) 為單位的平均坡度除以 10，例如研究區域之平均坡度為 5.69%，則斜率容差值則為 0.569 (Guidolin *et al.*, 2016)。

2.2 雨水下水道模組

本研究以暴雨經理模式 (SWMM, Huber *et al.*, 1998) 模擬水體在地表之逕流況，以及在雨水下水道系統內的流動情形。依據 Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology (2016) 於地表之逕流主要利用質量守恆方程式進行分析，如式 (22) 所示。

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \dots\dots\dots(22)$$

式中，
 d : 地表逕流水深 (m)；
 t : 單位時間 (sec)；
 i : 降雨+融雪速率 (m/sec)；
 e : 地表蒸發散效率 (m/sec)；
 f : 入滲率 (m/sec)；
 q : 逕流率 (m/sec)。

而 SWMM 模式雨水下水道系統內的流動狀態之主要控制方程式為連續方程式及迪·聖凡南 (De Saint-Venant) 變量流方程式，此外，可透過研究分析之需求選擇動力波方程式、擴散波方程式或運動波方程式來作為演算模擬之動量方程式，如式 (23) 及式 (24) 所示 (Yen, 1986、Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics, 2017)：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots(23)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \dots\dots\dots(24)$$

$$H = Z + Y \dots\dots\dots(25)$$

式中，
 Q : 管線流量 (m³/sec)；
 A : 管線通水斷面積 (m²)；

x : 沿流向之座標 (m)；
 t : 時間 (sec)；
 g : 重力加速度 (m/sec²)；
 H : 管線內水頭 (m)；
 S_f : 管線摩擦坡降；
 Z : 管底高程 (m)；
 Y : 管線水深 (m)。

曼寧公式推導可得之摩擦係數如式 (26)，而其中給定一斷面之絕對值平均速度，以避免數值計算時，平均流速因正負抵消而失去方向性。

$$S_f = \frac{n^2 Q |U|}{AR^{4/3}} \dots\dots\dots(26)$$

式中，
 n : 曼寧糙度係數 (sec/m^{1/3})；
 U : 管線內斷面之平均流速 (m/sec)
 $(U=Q/A)$ ；
 R : 水力半徑 (m)。

模式中雨水下水道管線內具有特定形狀，其通水斷面積 A 以及水力半徑 R 均為水深 Y 之函數，而水深 Y 加上管底高程 Z 可以得到水頭 H ，而 H 可由管線連結之上、下游人孔水位分析計算求得，並透過設定的起始以及邊界條件進行分析，即聯立式 (23) 及式 (24) 求解管線流量 Q 。

本研究採用 SWMM 模式的幹線輸水模組 (Extran Module)，其以人孔 (Node)-管線 (Link) 之觀念計算水體在雨水下水道系統中流動之情況。在管線 (Link) 中，假設流量不變並同時滿足動量方程式，即可得到管線內之流量；在人孔 (Node) 則是滿足連續方程式，以求得人孔之水位。其人孔儲蓄水體特性及管線輸送概念如圖 3 所示。

在管線 (Link) 的計算方式，依管線水流狀態可分為已滿管以及未滿管兩種，當狀態為已滿管時，該水體主要取決於壓力梯度，其由上下游的壓力水頭所

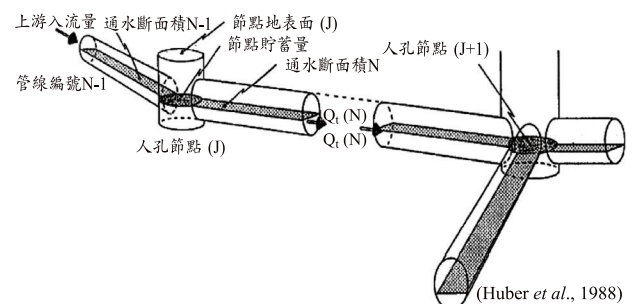


圖 3 人孔節點及管線輸送演算示意圖

控制，此時通水截面積為常數，控制方程式則改以連續方程式與能量方程式，如式 (27) 及式 (28)。在管線上下游端人孔之壓力水頭、出入口處的水頭損失係數均為已知，可從式 (28) 求解管線內之流量，再代入式 (27) 求得管線內之水頭 H 。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q}{A_{SN} + \sum A_{SL}} \quad (27)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 2U \frac{\partial A}{\partial t} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} - gA \frac{\partial H}{\partial x} - gA_f \quad (28)$$

式中， Q ：管線流量 (m^3/sec)；
 A_{SN} ：節點蓄水表面積 (m^2)；
 A_{SL} ：管線蓄水表面積 (m^2)；

而人孔 (Node) 於雨水下水道系統中，就有三種功能，分別為 1. 連結管線，2. 集水區出入流控制點，3. 儲蓄水體。當人孔的下游管線無法承擔上游管線的流量時，該人孔水位會因此上升，此時的人孔為儲蓄水體之功能，但尚未產生人孔溢流情況；反之，當水位超過儲蓄水量時，則會發生溢流情況。此時人孔溢流量 Q_o 如式 (29) 所示 (Yen, 1986)。

$$Q_o = \sum_i Q_{c,i} + Q_k - A \frac{\partial H}{\partial t} \quad (29)$$

式中， Q_o ：人孔溢流量 (m^3/sec)；
 $Q_{c,i}$ ：連接人孔節點管線流量 (m^3/sec)；
 i ：連結人孔節點之管線；
 Q_k ：地表集水區集流器入之流量 (m^3/sec)；
 A ：人孔截面積 (m^2)；
 H ：人孔水位 (m)。

人孔亦可分為兩種狀態，分別為已滿管與未滿管此兩種。當管線及人孔均為未滿管時，該人孔溢流量 Q_o 為零，因此，式 (29) 則簡化成式 (30)，此時連接人孔之管線流量 $Q_{c,i}$ 與入流量 Q_k 均為已知數據，可求解人孔之水位 H 。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{A} (\sum_i Q_{c,i} + Q_k) \quad (30)$$

當人孔與輸水管線均為滿管時，式 (30) 中有 H 及 Q_o 兩個未知變數，此時人孔改由式 (31) 分析，可先求出 Q_o 人孔溢流量，再藉由式 (32) 建立人孔之水位變量 ΔH 及流量 $Q_{c,i}$ 、 Q_k 、 Q_o 之間的關係 (陳宜宏，2002；王宜賀，2009)。

$$Q_o = \sum_i Q_{c,i} + Q_k \quad (31)$$

$$\sum_i Q_{c,i} + Q_k - Q_o + \sum_i \frac{\partial Q_{c,i}}{\partial H} \Delta H = 0 \quad (32)$$

透過上述計算分析出雨水下水道人孔節點水位變量 ΔH ，並進一步求得人孔水位 H 。當人孔水位未發生溢流時，因人孔具有儲蓄功能；反之，當人孔發生溢流時，其溢流量並入人孔溢流量 Q_o 計算，再以點源溢流方式進入二維漫地流模式，如圖 4 所示。

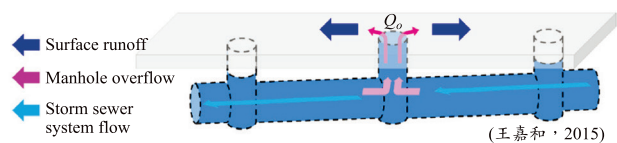


圖 4 人孔溢流示意圖

2.3 進水口與連接管模組

因為 SWMM 缺乏地表進水口的設置，因此本研究開發地表水的進水口模組，以堰流公式與孔口流公式計算道路進水口之入流量，如式 (33) 所示。

$$Q_h = \begin{cases} Q_w = c_w P h^{3/2}, & h < h_{critical} \\ Q_d = c_d A \sqrt{2gh}, & h \geq h_{critical} \end{cases} \quad (33)$$

式中， Q_h ：道路進水口入流量 (m^3/sec)；
 Q_w ：道路進水口堰流型式之入流量 (m^3/sec)；
 c_w ：堰流係數；
 P ：集流器之周長 (m)；
 h ：水深 (m)；
 $h_{critical}$ ：轉換水深 (m)；
 Q_d ：道路進水口孔口流型式之入流量 (m^3/sec)；
 c_d ：孔口流係數；
 A ：集流器之面積 (m^2)。

於分析完道路進水口入流量之後，可以經由連接管效應將其入流量引入雨水下水道系統中，其分析連接管效應時採用靜水壓原理來分析，如式 (34) 所示，式 (34) 中參數依據臺北市市區道路工程設計規範，連接管的管徑假定為 0.6 公尺，而側溝高度假定為 0.4 公尺，而側溝底部至人孔入流處高度設定為 1 公尺，其側溝排水側視圖如圖 5 所示。

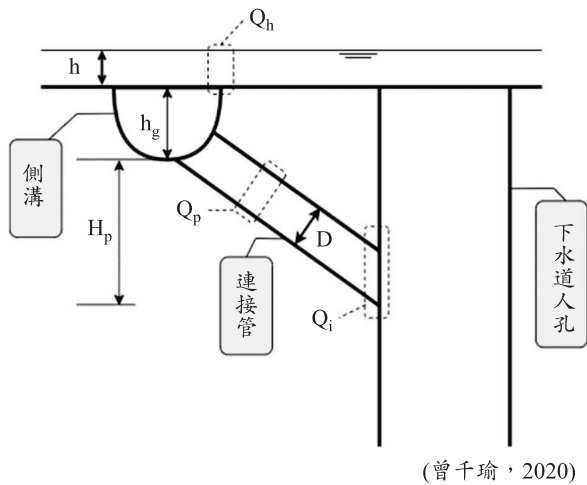


圖 5 排水系統側視圖

$$Q_p = c_p \frac{D}{4} \sqrt{2g(h_g + H_p)} \dots\dots\dots (34)$$

式中， Q_p : 連接管入流量 (m³/sec) ;
 c_p : 逕流係數 ;
 D : 連接管管徑 (m) ;
 h_g : 側溝高度 (m) ;
 H_p : 側溝底部至人孔入流處高度 (m)。

2.4 熱啟動模組

原臺北市降雨即時淹水平台的 30 分鐘更新一次的淹水模擬為 4 個小時的觀測雨量搭配 2 個小時的預報雨量 (臺灣大學, 2021), 其觀測雨量的部分與前一次的淹水模擬至少有 3 個小時的重複, 因此本研究利用熱啟動模組來減少觀測雨量的重複模擬, 以此將每 30 分鐘更新一次的淹水模擬提升為 10 分鐘一次。為了達成此目標, 觀測雨量部份從原先 4 個小時長度縮減為 10 分鐘長度, 淹水模擬開始時會讀取前一次淹水模擬的熱啟動文件 (hot start file) 來設定初始條件, 並且在觀測雨量部分 (10 分鐘觀測雨量) 模擬完成時輸出新的熱啟動文件來作為下一次的淹水模擬之初始條件。為了達到這樣的操作, 淹水平台的都會區快速淹水模式與自動化程序均進行修改, 介紹如下。

第一個部分為對於都會區快速淹水模式的修改, 使其能使用熱啟動文件來設定其初始條件 (initial condition), 並且能在模擬中輸出特定時間 (=模擬到第 10 分鐘時) 的熱啟動檔案來提供下一次淹水模擬設定其初始條件。本研究使用的都會區快速淹水模式包含了臺大細胞自動機快速淹水模式 (NTU-CAFIM) 與暴雨經理模式 (SWMM), 其中 SWMM 已可利用

FILES 標籤來讀入的熱啟動文件, 以此設定其模式內每個人孔節點、管線、抽水站等元件的初始狀態值 (初始水深、流量以及相關模擬運行的數值等)。然而, SWMM 僅能輸出模擬結尾時的熱啟動檔案, 尚無法輸出特定時間的熱啟動檔案。為解決此限制, 本研究修改了 SWMM 的 source code 使其能在模擬中輸出特定時間的熱啟動檔案。至於臺大細胞自動機快速淹水模式, 則修改其程式來使其能如 SWMM 一樣讀入初始設定值與輸出初始設定值 (模擬到 10 分鐘時)。臺大細胞自動機快速淹水模式的初始值包含了每個網格的水深與流速資料、每個網格之間的傳輸水體量以及自適應步長等模式參數。

第二個部分為平台的自動化程序, 本研究將熱啟動模組安插在準備某次的淹水模擬設定檔案的自動化程序內, 其運作規則如下。首先, 程序會自動搜尋前一次模擬所產出的熱啟動文件, 並將此文件複製到模擬運行所使用的資料夾內, 以便讓都會區快速淹水模式能讀入初始設定值, 而在此次的淹水模擬完成時, 則依照模擬時間為標籤將都會區快速淹水模式新輸出的熱啟動文件備份到資料庫內, 以備下一次淹水模擬之用。由此, 平台之運行頻率即可由 30 分鐘縮減為 10 分鐘一次, 能夠大幅增加供給淹水預報的頻率與時效性。

三、研究區域概述與資料蒐集

本研究以臺北市為研究區域, 彙整臺北市水文、地文以及排水設施、抽水站等相關資料, 包括即時雨量站資料、QPESUMS (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor) 預報雨量資料、數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 資料、土地利用資料、道路街廓資料、雨水下水道人孔位置配、雨水下水道管線配置、雨水下水道水位觀測資料與近年積淹水調查資料範圍等相關資料。

3.1 雨量資料

本研究建構了一套自動化程序來自動抓取觀測雨量資料與預報雨量資料, 將兩種雨量資料整理後即可輸入到所建構的都會區淹水模式內進行模擬。在觀測雨量部分, 本研究利用臺北市水利處資料交換平臺 API 所提供的雨量站資料, 其即時資料的更新頻率為每分鐘 1 次。本研究取鄰近臺北市的 86 站觀測雨量資料輸入都會區淹水模式, 所採用的雨量站如圖 6 所示。預報降量部分, 採用 QPESUMS 降雨預報, 其網

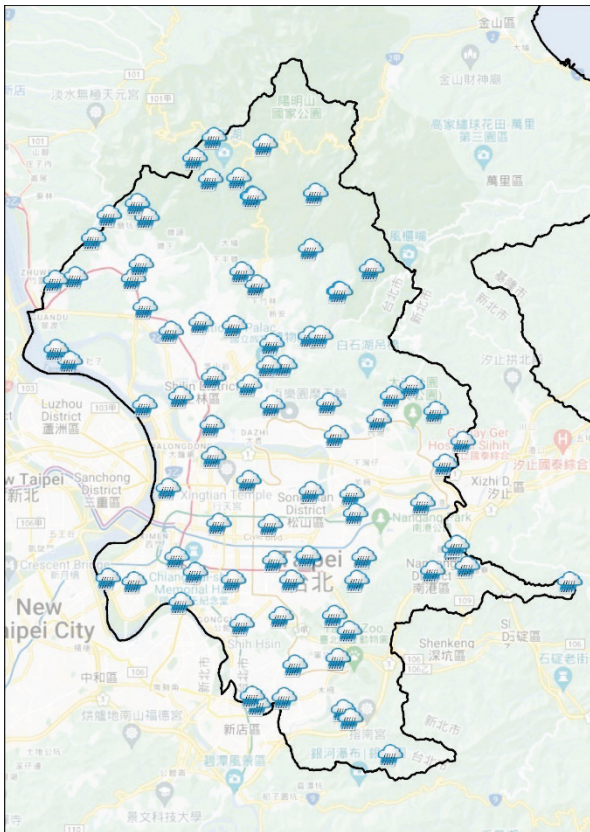


圖 6 選用雨量站位置圖

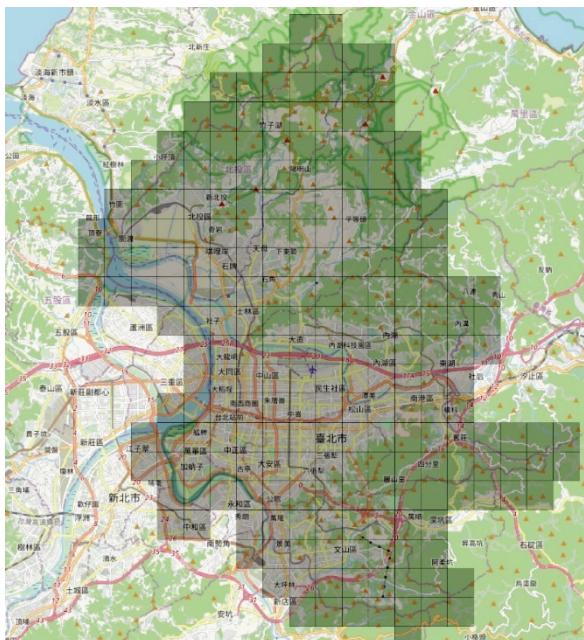


圖 7 QPESUMS 降雨預報網格圖

格解析度為 0.0125 度 (約 1.25 公里)，如圖 7 所示，此 QPESUMS 資料為利用當時雷達回波資料推估未來 1~3 小時每小時降雨強度資料，惟經由本團隊測試後

發現 2~3 小時的預報與後來的觀測存在較大的誤差，因此後續僅採用 QPESUMS 對於未來兩小時的預報雨量結果，並利用 QPESUMS 未來兩小時的預報雨量結合熱啟動資料輸入臺大細胞自動機快速淹水模式中進行 10 分鐘更新頻率的即時淹水預報評估。

3.2 雨水下水道相關資料、數值地形高程與土地利用資料

雨水下水道資料部分取自臺北市資料大平臺的臺北市水利處雨水下水道人孔資料以及雨水下水道管線資料，臺北市雨水下水道管線、抽水站等相關資料如圖 8 所示，管線共計 17,408 條，總長度約 730 公里，人孔分布位置總計 16,936 點。數值高程模型資料為臺北市政府提供所提供之 1 公尺網格高程資料，在本研究中將 DEM 資料轉成 10 公尺網格解析度來匯入淹水模式進行模擬，如圖 9 所示。而土地利用資料部分上，本研究採用 2015 年內政部地政司所提供之國土利用現況調查數化資料，依本研究區域之土地利用分為九大類別，分別為農業、森林、交通、水利、建築、公共、遊憩、礦鹽與其他，如圖 10 所示，其土地利用色階請參考 109 年版國土利用色碼表。

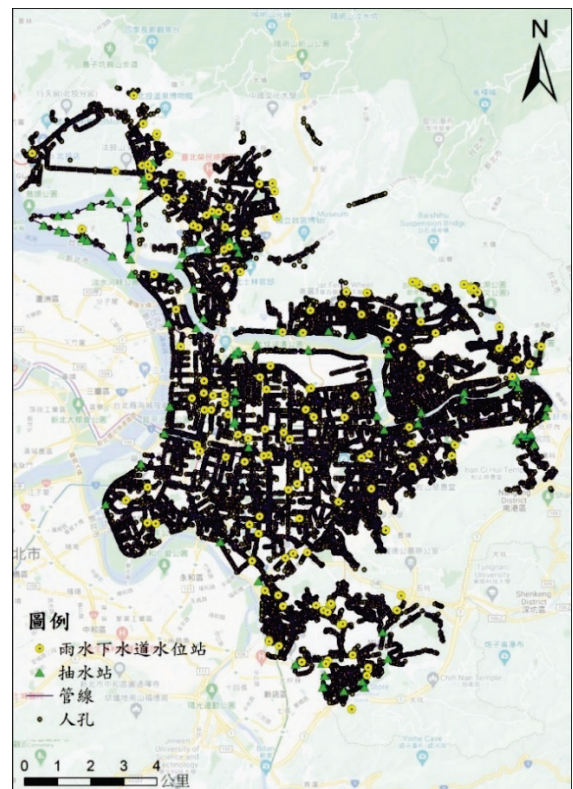


圖 8 雨水下水道系統圖

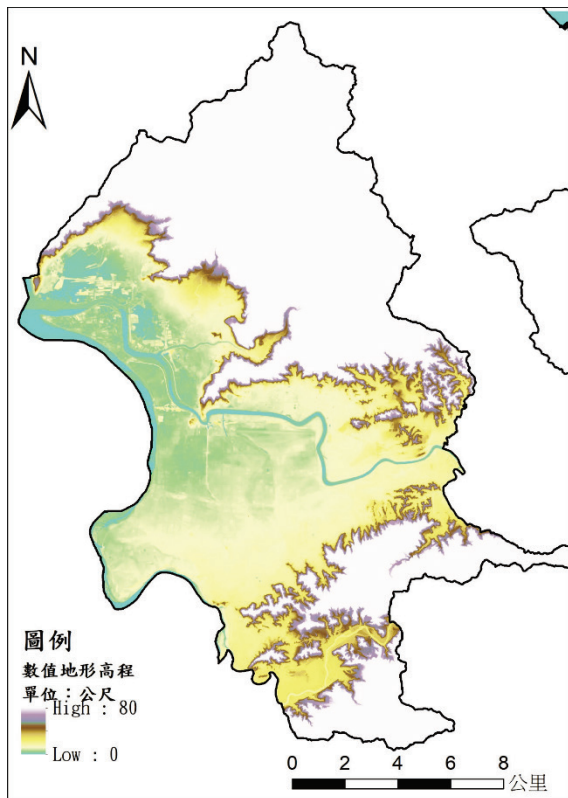


圖 9 數值高程模型圖

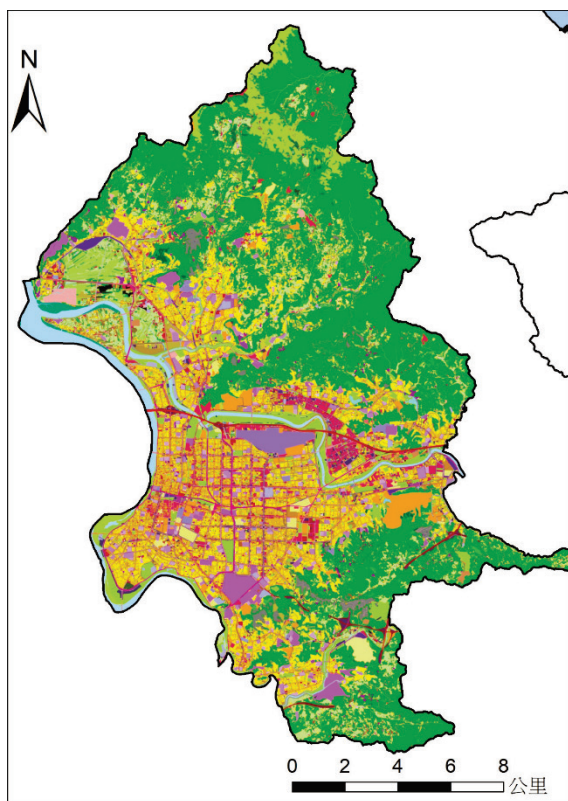


圖 10 土地利用圖
(色階請參考 109 年版國土利用色碼表)

四、模式建置及淹水評估

4.1 模式建置

本研究利用所蒐集的雨水下水道系統資料建置一維雨水下水道模式，並以臺北市政府所提供的精細化數值地形高程、土地利用、街道圖等地文資料，配合淹水潛勢圖、臺北市降雨淹水模擬圖以及模擬時效性，建置全市 10 公尺 × 10 公尺的二維快速漫地流淹水模式，並介接臺北市政府 86 站觀測雨量資料以及 QPESUMS 降雨預報雨量資料進行即時快速都市淹水模擬。二維快速漫地流淹水模式部分，共建有 1,775,053 個網格。本研究計畫以河川集水分區、雨水下水道分區將臺北市分為 7 個集水分區，分別為士林北投、大直內湖、信義南港、木柵景美、政大道南、雙園與新生 7 個分區，各區域二維漫地流網格數如表 1 所示，而山區逕流部分與建物區塊如圖 11 所示。本研究所建立的即時淹水預報平台係運用配備為 Intel (R) Core (TM) i9-9900K CPU @ 3.60GHz 且 RAM = 16 GB 的電腦，於後續歷史淹水事件模擬以及即時淹水模擬上皆使用此設備。

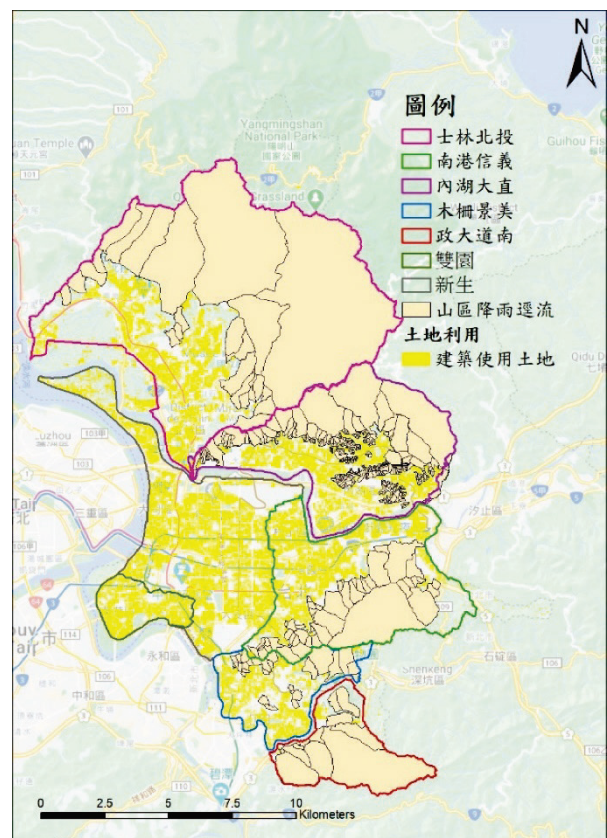


圖 11 集水分區圖

表 1 二維漫地流各分區網格數

分區	網格數
士林北投	358378
大直內湖	361910
信義南港	349343
木柵景美	131248
政大道南	156187
雙園	59779
新生	358208
總和	1775053

4.2 熱啟動模擬之水位比較

本研究利用 2021 年 0604 豪雨事件進行模擬比較，利用 0604 豪雨事件 08:00 至 17:00 實際降雨資料作為雨量輸入條件，其中非熱啟動模式模擬（原先 30 分鐘排程之模擬）分別以 08:00~12:00、08:30~12:30、09:00~13:30、09:30~13:30、10:00~14:00、10:30~14:30、11:00~15:00 作為 4 小時觀測雨量，以 12:00~14:00、12:30~14:30、13:00~15:00、13:30~15:30、14:00~16:00、14:30~16:30、15:00~17:00 做為未來 2 小時預報雨量；而熱啟動模式模擬以 10 分鐘+120 分鐘雨量進行模擬，其中 10 分鐘作為即時觀測資料更新，而 120 分鐘為淹水預報時的 QPESUMS 預報雨量，此時為模式驗證比較，因此均使用真實觀測雨量資料。

在模擬精確度部分，於雨水下水道水位的部分以玉成抽水站區域進行探討，其區域內水位計如圖 12 所示，共有玉成 3~10、玉成 12~14 共 11 支水位計，而 2021/06/04 12:00~16:30 水位紀錄如圖 13 所示，

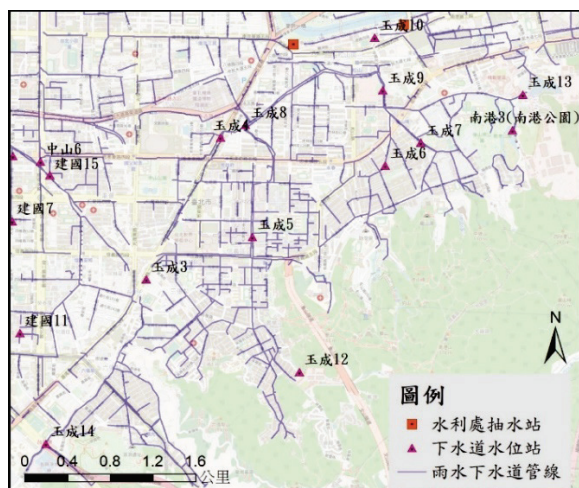


圖 12 玉成抽水站分區水位計分布圖

由圖 14 可知玉成 5、6、10 水位紀錄異常與其他水位計以及降雨趨勢截然不同，因此不做討論；而玉成 12 為明溝水位計，此明溝沒有詳細斷面調查資料造成水位誤差，如圖 15 所示；玉成 13 受東新陂放水影響，

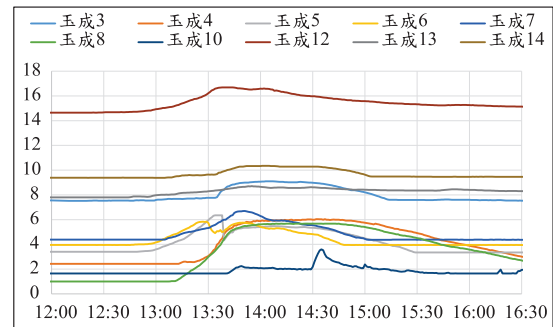


圖 13 玉成抽水站分區水位計觀測水位圖

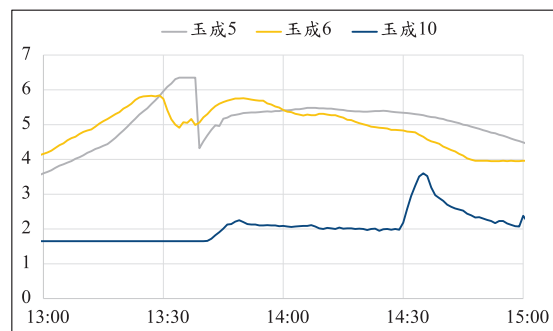


圖 14 玉成抽水站分區異常觀測水位圖

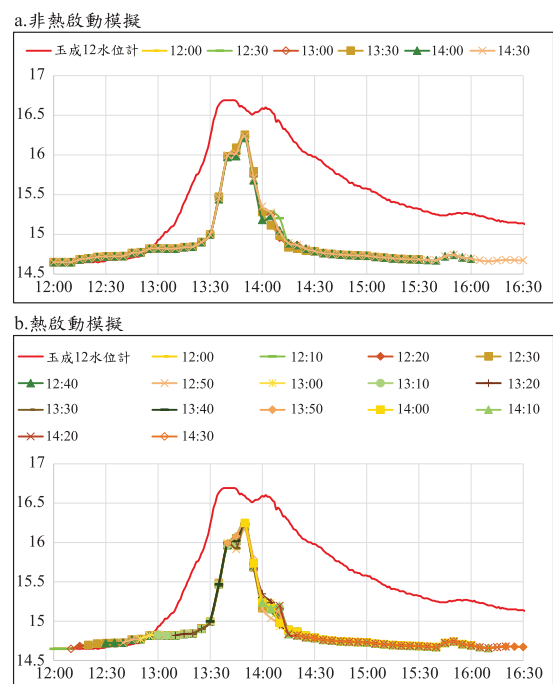
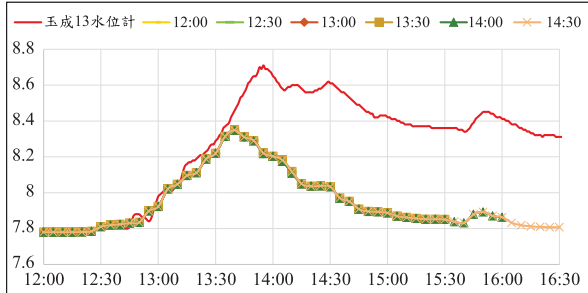


圖 15 玉成 12 水位計水位圖

a. 非熱啟動模擬



b. 熱啟動模擬

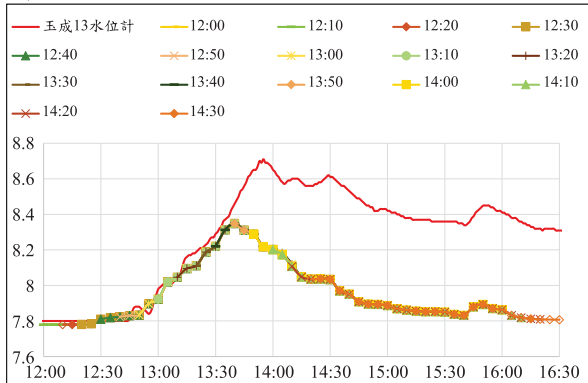
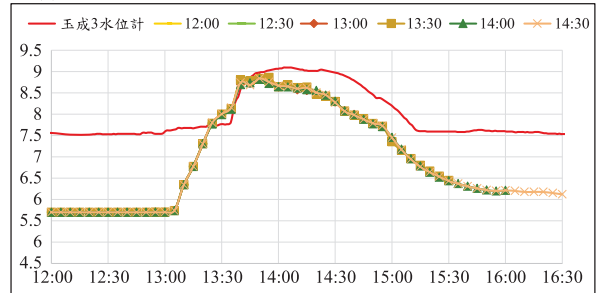


圖 16 玉成 13 水位計水位圖

a. 非熱啟動模擬



b. 熱啟動模擬

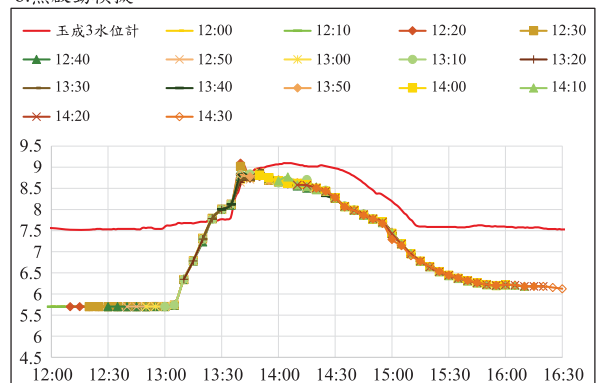
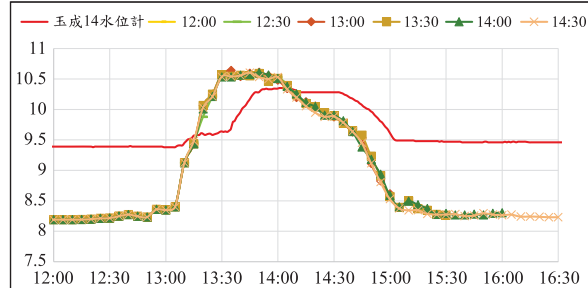


圖 18 玉成 3 水位計水位圖

a. 非熱啟動模擬



b. 熱啟動模擬

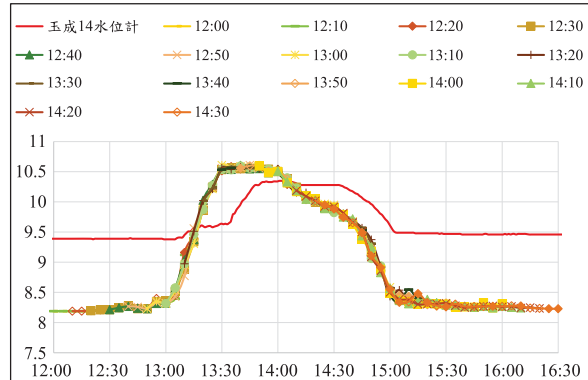
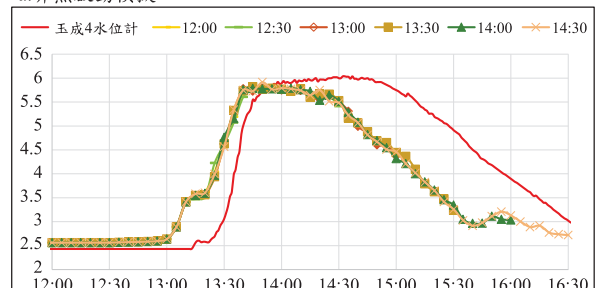


圖 17 玉成 14 水位計水位圖

a. 非熱啟動模擬



b. 熱啟動模擬

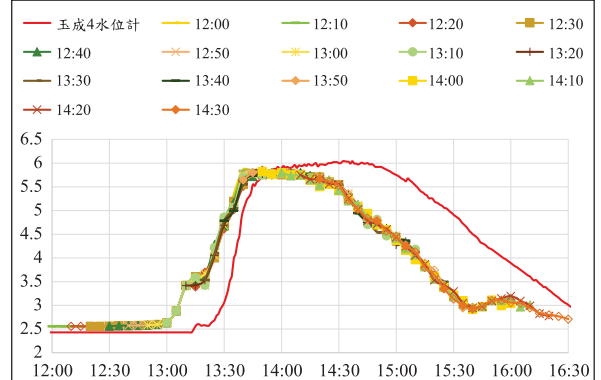


圖 19 玉成 4 水位計水位圖

無法得知東新陂初始水位以及放水操作，因此造成水位誤差較大，如圖 16 所示；玉成 14 受臺灣大學雨量站雨量異常影響（最大 60 分鐘 209 mm），造成模擬之

雨水下水道水位高估，如圖 17 所示；其餘以玉成 3、玉成 4、玉成 7、玉成 8 以及玉成 9 水位計峰值水位均較為符合觀測水位，如圖 18 至圖 21 所示，由圖 15 至

圖 21 可知非熱啟動與熱啟動模擬於水位計模擬水位相當接近，而模擬水位上升以及下降均有比觀測水位提前約 5~10 分鐘的現象，推測是因為忽略側溝傳輸所需時間造成的時間提前。

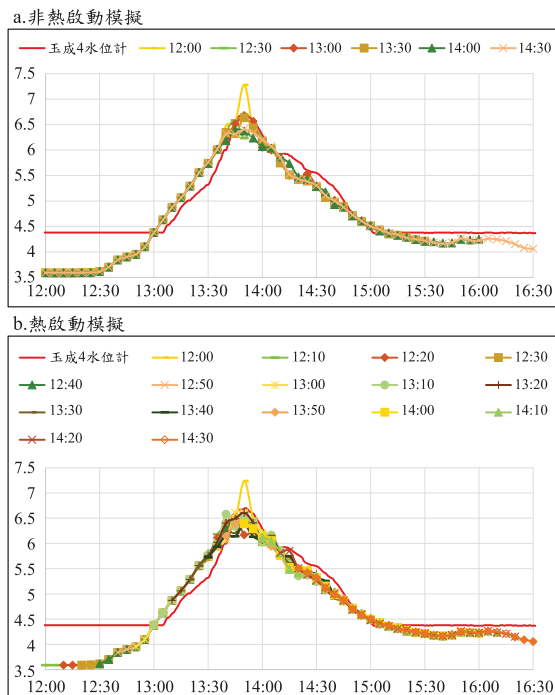


圖 20 玉成 7 水位計水位圖

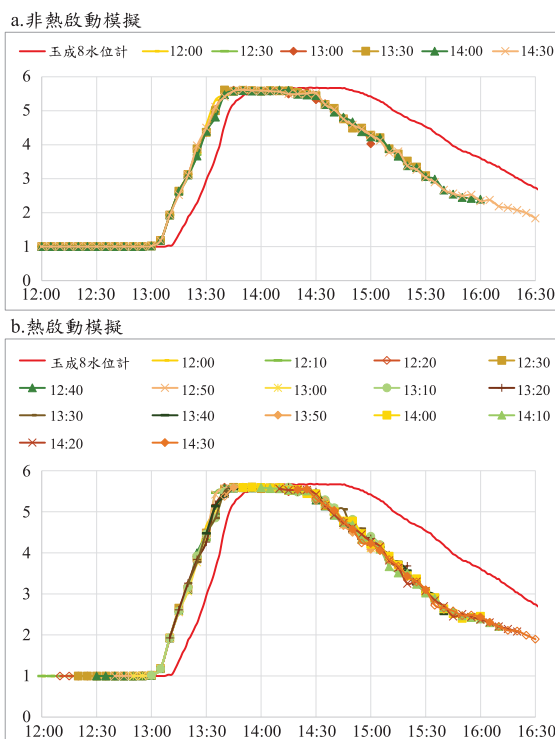


圖 21 玉成 8 水位計水位圖

4.3 地表漫地流淹水分析比較與即時淹水模擬

在淹水模擬結果部分，以兩者之模擬淹水深度最大之時刻 14:00 來看，非熱啟動與熱啟動模式在信義區周邊（市府捷運站周邊）的淹水情況如圖 22 所示，而在忠孝-仁愛圓環周邊的淹水情況如圖 23 所示，其非熱啟動與熱啟動模式兩者淹水範圍相當近似。（積淹水資料來源：臺北市資料大平臺、臺北市積水資訊網）。

另外，本研究為比對非熱啟動與熱啟動模式於臺北市全區的淹水模擬結果是否相同，亦在最大降雨後的 10 到 30 分鐘內進行淹水圖之比對，如圖 24 所示，結果顯示兩模式之差距甚小（差距最大僅到 0.0015 m）。然而，在模擬時間上，14:00 時非熱啟動模式與熱啟動模式最大分別需要 22.7 分鐘與 8.8 分鐘來完成各自的模擬，表示熱啟動模式可以進一步減少觀測降雨部分重複 4 小時所耗費的 14 分鐘模擬時間，且熱啟動模式僅需非熱啟動模式的 39 % 模擬時間即可提供相同準確度的預報模擬結果。

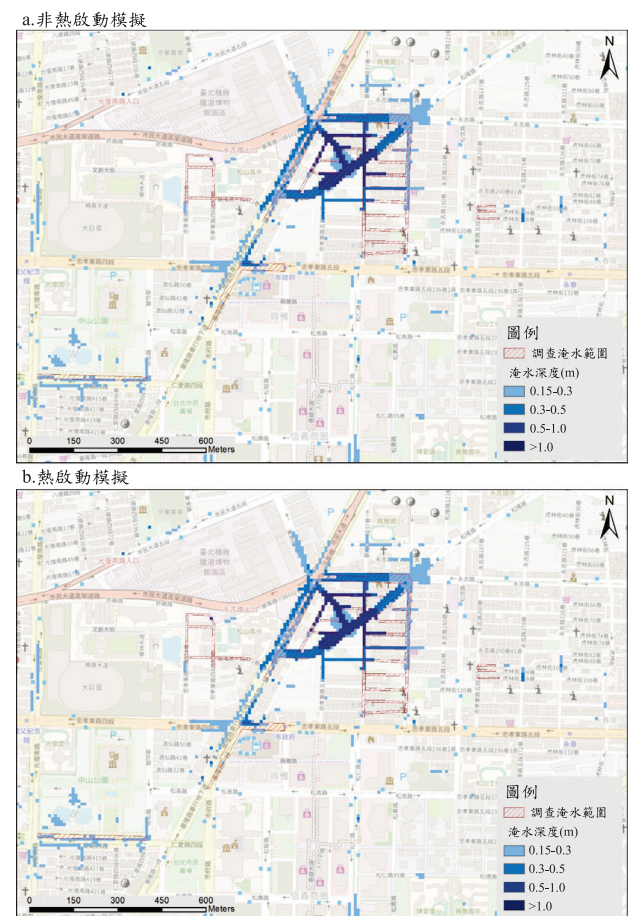
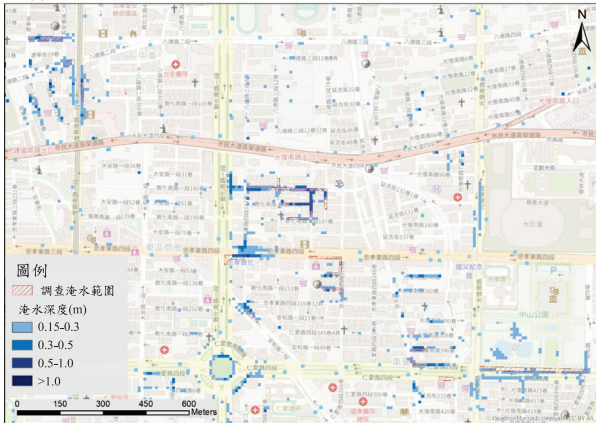


圖 22 信義區周邊淹水模擬圖

a. 非熱啟動模擬



b. 熱啟動模擬

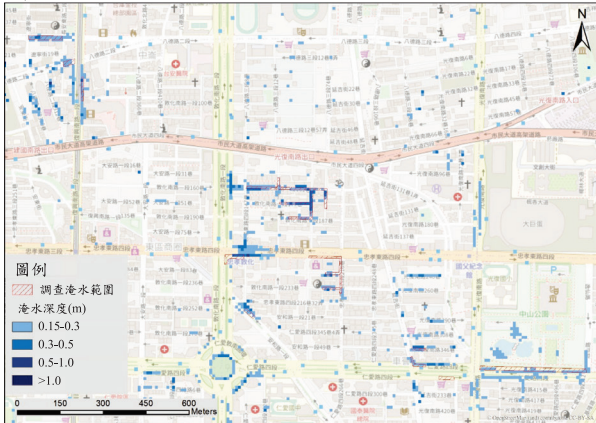


圖 23 敦化-仁愛圓環周邊淹水模擬圖

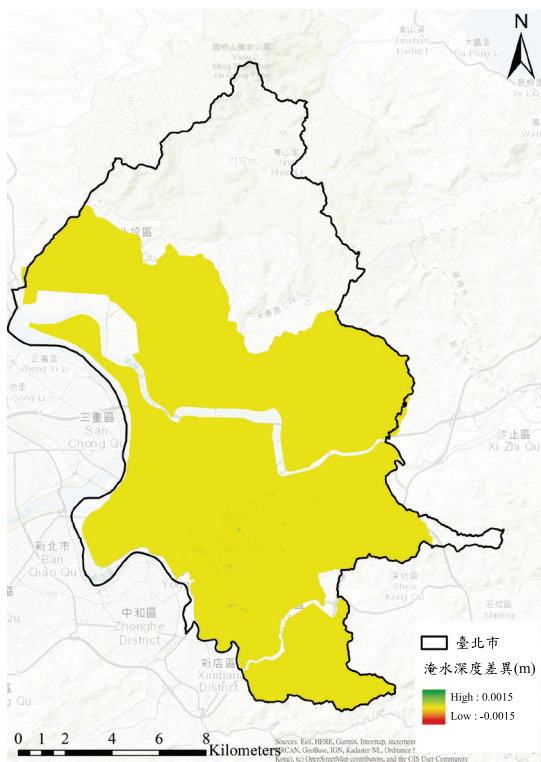


圖 24 熱啟動與非熱啟動模擬淹水差異圖

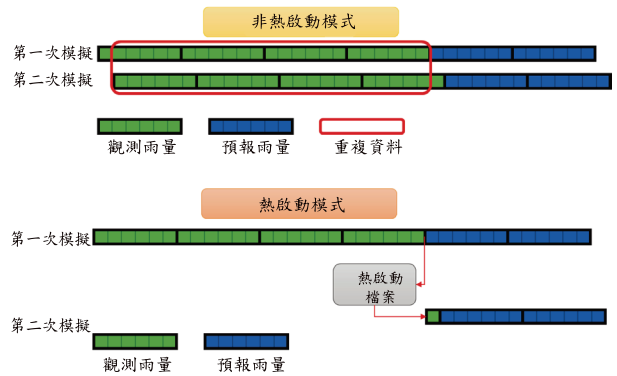


圖 25 NTU-CAFIM 熱啟動修改示意圖

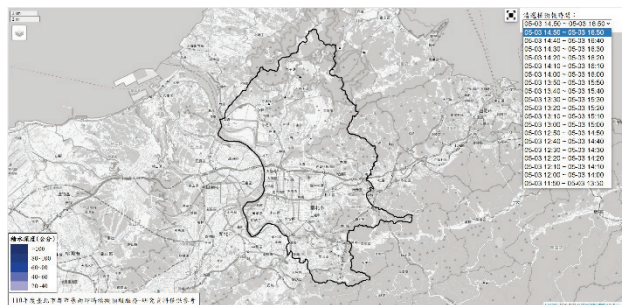


圖 26 NTU-CAFIM 熱啟動測試網頁圖

本計畫亦利用 NTU-CAFIM 之水位、流速、流量等狀態設置儲存與讀入的熱啟動檔案，此熱啟動檔案會儲存某一時間之模擬結果並作為下一次模擬的初始資料，以利用於每 10 分鐘更新之觀測與預報雨量資料的推進演算，可以避免過去觀測雨量資料的重複計算，如圖 25 所示，可以節省過去 4 小時觀測降雨的計算時間，其結果已經於網頁上進行線上即時作業，如圖 26 所示於 2022 年 2 月 25 日已正式上線使用。
(https://storage.googleapis.com/taipei-2020/web/flooding_map.html)

而圖 21 為 2021 年 06 月 04 日玉成 8 水位計與熱啟動預報結果比較，由圖可知各預報時間點均可以與上次預報的 10 分鐘資料疊合，代表熱啟動的初始資料為上次模擬的 10 分鐘輸出資料無誤，未來可以利用下水道、前池水位觀測資料帶入熱啟動模式中，讓模式更加精確。而 2021 年 06 月 04 日熱啟動模擬未來 120 分鐘積水情況，最長模擬時間約為 8.8 分鐘，代表本模式可以在 10 分鐘內預報未來 120 分鐘的積水情況。

五、結論

本研究更新臺大細胞自動機快速淹水模式 (NTU-

CAFIM) 並研發熱啟動模式 (Hot-start Model)，利用每次模擬時所產製的熱啟動文件 (Hot-Start File) 進行即時淹水模擬的資料暫存，其資料包含地表以及雨水下水道流況 (水位、流速、流向等)，同時結合 QPESUMS 降雨預報進行未來 2 小時的淹水預報，以此方式進行每 10 分鐘更新頻率的熱啟動文件 (Hot-Start File) 暫存與淹水預報發布，讓原先每 30 分鐘跟新的未來 2 小時淹水預報精準為每 10 分鐘更新。

以臺北市 2021 年 0604 豪雨事件進行測試，經由玉成抽水站集流區域水位計比較，去除水位紀錄異常、雨量資料異常以及相關水利設施資料不完整的水位計，其他水位計熱啟動與非熱啟動水位幾乎相同，而熱啟動/非熱啟動模擬與觀測峰值均非常近似，但因為缺少側溝、進水口等相關小系統詳細資料，因此造成水位上升段、下降段均有提前 5 ~ 10 分鐘的現象。

而地表積淹水，非熱啟動與熱啟動模式於兩模式之差距甚小，差距最大僅到 0.0015 m。因此，精進的熱啟動模式可以提供與原先非熱啟動模式幾乎完全一樣的淹水預報結果但僅需後者 39 % 的計算時間。

六、建議

本研究於熱啟動模式 (Hot-start Model) 中亦有測試下水道水位計資料，利用每次模擬時所產製的熱啟動文件 (Hot-Start File) 進行即時淹水模擬的資料暫存以及水位計觀測水位置換，但在測試中發現，當抽水站操作有提前抽水與關閘門的情況發生時，會因為抽水站操作實際狀況與規畫設置不同，造成下水道水位有所誤差，其原因為 SWMM 模式中的設定是以規畫設置為主，此時若使用下水道水位計水位資料以及熱啟動文件 (Hot-Start File) 水位資料，會造成水位不連續、震盪等現象，因此，若要進行下水道水位資料熱啟動同化 (置換)，尚需要即時接收抽水站操作情況，以確保模式與實際狀況一致。

致謝

本研究承蒙臺北市政府工務局 108、109 年度工務建設科學研究創新計畫經費補助與技術支援得以順利完成階段性成果並持續精進與推廣應用，謹致謝忱，其臺北市政府工務局建設科學研究創新計畫即時積淹水預測成果網站：<https://storage.googleapis.com/taipei-2020/web/index.html>。

參考文獻

1. Chang, T. J., Wang, C. H., Chen, A. S. (2015). A Novel Approach to Model Dynamic Flow Interactions Between Storm Sewer System and Overland Surface for Different Land Covers in Urban Areas. *Journal of Hydrology*, 524, 662-679.
2. Chang, T. J., Wang, C. H., Chen, A. S., Djordjević, S. (2018). The Effect of Inclusion of Inlets in Dual Drainage Modelling. *Journal of Hydrology*, 559, 541-555.
3. Guidolin, M., Chen, A. S., Ghimire, B., Keedwell, E. C., Djordjević, S., Savić, D. A. (2016). A Weighted Cellular Automata 2D Inundation Model for Rapid Flood Analysis. *Environmental Modelling and Software*, 84, 378-394.
4. Guidolin, M., Chen, A. S., Pasquale, N. (2015). CADDIES: Caflood Application User Guide.
5. Hsu, M. H., Chen, S. H., Chang, T. J. (2000). Inundation Simulation for Urban Drainage Basin with Storm Sewer System. *Journal of Hydrology*, 234(1-2), 21-37.
6. Huber, W. C. and Dickinson, R. E. (1988). Storm Water Management Model, User's Manual Ver. IV, U.S. EPA.
7. Hunter, N. M., Horritt, M. S., Bates, P. D., Wilson, M. D., Werner, M. G. F. (2005). An Adaptive Time Step Solution for Raster-based Storage Cell Modelling of Floodplain Inundation. *Advances in Water Resources*, 28, 975-991.
8. Rossman LA 2017. "Storm Water Management Model Reference Manual Volume II - Hydraulics." *EPA/600/R-17/111*.
9. Rossman LA, and Huber WC.2016a. "Storm Water Management Model Reference Manual Volume I - Hydrology." *EPA/600/R-15/162A*.
10. Yen, B. C. (1986). Hydraulics of Sewers. *Advances in Hydrosience*, 14, 1-123.
11. 王宣賀，2009 年，「氣候變遷對台北市雨水下水道系統之衝擊影響評估」，國立臺灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
12. 王嘉和，2015 年，「新一代都會區地表與雨水下水道水流互動之淹水模擬」，國立臺灣大學生物環境系統工程學系博士論文。
13. 王嘉和、王嘉瑜、游翔麟、曾千瑜、林志峯、張倉榮，2021 年，「地表細胞自動機快速淹水-街道集流器-雨水下水道管網之整合模擬分析：臺北市強降雨即時淹水預報平台之研發」，農業工程學報，67(3)，P.1~17。

14. 林吉堃，2018 年，「都會區快速淹水模擬模式之研發與應用」，國立臺灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
15. 國立臺灣大學，2021 年，「110 年度臺北市都市暴雨即時模擬預報服務」，臺北市政府工務局水利工程處。
16. 陳宣宏，2002 年，「漫地流與雨水下水道水流之交互動態模擬」，國立臺灣大學生物環境系統工程學系博士論文。
17. 曾千瑜，2020 年，「都會區排水系統進水口堵塞及下水道淤積之淹水影響評估」，國立臺灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
18. 臺北市資料大平臺，<https://data.taipei/>。
19. 臺北市積水資訊網，
<https://heovcenter.gov.taipei/TpeFloodRecord/>。
20. 110 年度臺北市都市暴雨即時模擬預報服務，
<https://storage.googleapis.com/taipei-2020/web/index.html>。

收稿日期：民國 111 年 11 月 03 日

修改日期：民國 111 年 12 月 12 日

接受日期：民國 111 年 12 月 20 日