

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

An Integrated Pluvial Flood Analysis with Dual Drainage Modeling
(Cellular Automata Overland Flow-Street Gully Inlet-Stormwater Sewer Networks):
The Development of Real-time Flood Inundation Forecasting Platform in Taipei City

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
研究助理

曾 千 瑜
Chien-Yu Tseng

國立臺灣大學
水工試驗所
研究助理

王 嘉 瑜
Jia-Yu Wang

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
博士後研究員

游 翔 麟
Hsiang-Lin Yu

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

近年來發生極端降雨事件的頻率增加，短延時強降雨暴雨強度越來越大，嚴峻考驗排水設施的排水能力，使得都會區淹水災害事件頻傳。淹水模擬結果可提供防洪防災工作之參考，可有效降低災害帶來的生命財產損失。短延時強降雨事件造成排水系統無法負荷短時間內過量之逕流量，如道路進水口、連接管之排水能力，因此，要正確的進行都會區積淹水評估需考量道路進水口、連接管以及建築物之排水能力。但現今都市淹水模式因計算時間較長而導致其仍無法大量運用於即時積淹水預報，多為利用設計雨型以及雨量進行事前的淹水潛勢分析，缺乏時效性、難以做到即時預警應變之應用。

本研究以臺大細胞自動機快速淹水模式(NTU-CAFIM)結合暴雨經理模式(SWMM)來建構預報平台，並考量道路進水口、連接管與建築物的排水能力來進行都會區快速淹水模擬，有利即時淹水評估以及大量淹水模擬。針對臺北市進行積淹水模擬評估，在歷史積淹水事件其偵測率約有 60 % 以上，而利用降雨預報之即時淹水評估可以提前 30~60 分鐘評估出可能積淹水的位置。

關鍵詞：即時淹水模擬、細胞自動機、雨水下水道、道路進水口與連接管、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

An Integrated Pluvial Flood Analysis with Dual Drainage Modeling (Cellular Automata Overland Flow-Street Gully Inlet-Stormwater Sewer Networks): The Development of Real-time Flood Inundation Forecasting Platform in Taipei City

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

Chih-Feng Lin

Taipei City Government
Public Works Department

Tsang-Jung Chang*

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

ABSTRACT

In recent years, the frequencies of extreme weather events are increasing due to climate change. Severe urban flooding events occur when the capacity of the drainage networks is incapable to cope with the intense rainfall in such conditions, especially under short-duration rainfall events. To correctly reflect the aforementioned flow conditions in short-duration rainfall events, the urban 2D/1D inundation models used for providing flooding maps should consider the limited capacities of road inlets and connected pipes between the gullies and the sewer systems. Moreover, the runoffs from buildings should be appropriately handled. Although the numerical accuracies of current urban 2D/1D inundation models are acceptable by including the aforementioned key factors, these models often suffer from unacceptable long computational time due to the heavy operations they introduce. Such a condition causes urban 2D/1D inundation models to be inappropriate on real-time evaluations of flood inundation in urban areas. Consequently, these models are usually adopted on producing flood maps off-line.

In the present study, the two-dimensional overland flow model based on Cellular Automata (National Taiwan University Cellular Automata Flood Inundation Model, NTU-CAFIM), which is remarkable to have high numerical efficiency, is coupled with SWMM to develop an urban 2D/1D inundation model. The limited capacities of road inlets and connected pipes are considered in the dynamic linkage between the overland and sewer flow models. The proposed model is used in Taipei City to construct a real-time flood inundation forecasting platform. Several historical flood events within Taipei City are selected to verify the proposed model. In terms of predicted flood extents, the values of POD (Probability of Detection) in these cases are beyond 60%, which demonstrates the satisfactory accuracy of the model. The real-time evaluation of flood inundation automatically provided by the platform can estimate the potential flooded regions 30 to 60 minutes ahead.

Keywords: Real-time flood inundation modeling, Cellular Automata, SWMM, Road inlets and connected pipes, Flood inundation forecasting platform.

Wang, C.H., Wang, J.Y., Yu, H.L., Tseng, C.Y., Lin, C.F., & Chang, T.J. (2021). "An Integrated Pluvial Flood Analysis with Dual Drainage Modeling (Cellular Automata Overland Flow-Street Gully Inlet-Stormwater Sewer Networks): The Development of Real-time Flood Inundation Forecasting Platform in Taipei City." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 67(3), 1-17. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202109_67\(3\).0001](https://doi.org/10.29974/JTAE.202109_67(3).0001)

一、前言

近年來因為極端降雨事件日趨頻繁，加上都會區發展過程中地表不透水鋪面的增加，是以導致地表逕流量日益加大，造成都會區發生積淹水的機率提高，而當積淹水發生時連帶影響了人民的生命財產安全、交通聯絡通道的運作以及多元化經濟產業的活動。因此，透過排水系統精進都會區淹水模擬的評估能力，以了解該都會區的排水逕流特性以及探討致災的風險成因顯得相對重要。

因現今都會區排水設計大多是以下水道系統進行排水，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，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，並以側溝與連接管來分析增加都會區積淹水評估之準確性。

在都會區淹水模擬的發展歷程中，可以發現當二維地表之模擬範圍具高複雜性或其為高分辨率網格時，在模擬過程需要龐大的計算資源與時間。因此為了可以快速且大範圍地進行淹水評估，Ghimire *et al.* (2013) 與 Guidolin *et al.*(2016) 提出以方形 Von Neumann 型規律網格建立之細胞自動機快速淹水模式 (Cellular Automata 2D, CA2D)與權重細胞自動機淹水模式 (Weighted Cellular Automata 2D, WCA2D)。CA2D 係將中央細胞與其鄰域細胞之水位進行排序後，以水位達平衡的概念將中央細胞的水體不斷反覆地往鄰域細胞傳遞直到水位達平衡或是中央細胞之水體耗盡。至於 WCA2D 模式則以權重概念之轉換規則來計算中央細胞往鄰域細胞傳遞的水量，可更進一步簡化水體傳遞的計算量。以英國基斯利的斯托克布里奇 (Stockbridge, Keighley, UK) 做為模擬區域進行都會區淹水模擬之比較，CA2D 雖能大幅地減少模擬演算所費之時間，但 WCA2D 比 CA2D 具有更佳的演算速率及模擬結果。雖然如此，WCA2D 模式仍僅支援單一地表曼寧糙度值。因此本研究將改良權重細胞自動機淹水模式，將其與雨水下水道模式結合，並考量進水口、連接管與建築物的排水能力，以此建構模式來進行臺北市積淹水評估與即時預報。本文主要描述其快速模擬成效以及平台即時評估應用，後續將與其他模型比較，並進行二維漫地流與一維雨水下水道銜接分析與效率評估。

二、研究方法

本研究為進行快速都會區積淹水評估，因此需要使用一維雨水下水道模式結合二維快速漫地流模式，並考量道路進水口、連接管與建築物等的排水能力來進行積淹水評估，故以臺大細胞自動機快速淹水模式 (National Taiwan University Cellular Automata Flood Inundation Model, NTU-CAFIM) 模式結合暴雨經理模式 (Storm Water Management Model, SWMM) 進行模擬，其模式之詳細說明如以下章節。為了後續說明的方便，此整合後的模式稱之為都會區快速淹水模式。

2.1 臺大細胞自動機快速淹水模式

臺大細胞自動機快速淹水模式係以 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。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，計算方法如式(1)與式(2)所示，上標 t 表示為當前時刻。

$$\Delta l_{0,i}^t = \max \{ l_0^t - l_i^t, 0 \}, i = 1 \sim p \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta l_{min}^t = \min \left\{ \Delta l_{0,i}^t \mid \frac{\Delta l_{0,i}^t}{l_i^t} > \tau \right\}, i = 1 \sim p \dots\dots\dots(2)$$

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)；
 p : 鄰域細胞數量(本研究取為 4 個)；
 τ : 水位差容差值(m)；
 $\Delta l_{0,i}^t$: 中央細胞與第 i 個鄰域細胞水位差(m)；
 Δl_{min}^t : 中央細胞與鄰域細胞之最小水位差(m)。

於細胞出流計算所使用之權重係數加入地表曼寧糙度的考量，而兩種細胞交界之地表曼寧糙度值給定方法採用中央細胞之地表曼寧糙度值計算(張鈞淳，2019)。又以總水頭 H 與 v^2/g 正比之關係，以曼寧公式表示流速 v ，在如式(3)。式(3)為假設寬矩形流況，是以水力半徑與通水斷面積均以中央細胞水深計算，其中地表曼寧糙度值 n 採用中央細胞之值。

$$v_{0,i}^t = \frac{d_0^{\frac{2}{3}}}{n} \left(\frac{\Delta l_{0,i}^t}{\Delta x_{0,i}} \right)^{0.5}, i=1 \sim p \quad (3)$$

式中， d_0 : 中央細胞水深(m)；
 n : 中央細胞之地表曼寧糙度值
(sec/m^{1/3})；
 $\Delta x_{0,i}$: 中央細胞與第 i 個鄰域細胞中心距離
(m)；
 $v_{0,i}^t$: 中央細胞與第 i 個鄰域細胞間流速
(m/sec)。

因模式計算時採用規則方型網格，故中央細胞與第 i 個鄰域細胞中心距離為定值，且總水頭正比於 v^2 。由式(4)可得到每個鄰域細胞之權重比例，如式(5)所示(張鈞淳，2019)。

$$w_i^t = \frac{\Delta l_{0,i}^t}{n^2}, i=1 \sim p \quad (4)$$

$$W_i^t = \frac{w_i^t}{\sum_{i=1}^p w_i^t}, i=1 \sim p \quad (5)$$

式中， w_i^t : 第 i 個鄰域細胞之權重比例；
 W_i^t : 第 i 個鄰域細胞之權重係數。

權重之計算範例如圖 1 圖 1 所示，細胞交界之地表曼寧糙度值給定方法以中心法為例。圖中編號 4 的鄰域細胞接收水體量為 0，編號 2、3 的鄰域細胞從中央細胞(細胞編號為 0)所接收到的水體量比值為 W_2^t / W_3^t ，表示只需計算最大權重係數之鄰域細胞的接收水體量，其餘鄰域細胞的接收水體量則可由權重係數之比值求出，以此節省計算量。

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(6)：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_M^t) 除以其權重係數，其中 I_M^t 可由式(7)計算而得；第三項為中央細胞出流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(式(10))與上一次從中央細胞與鄰域細胞傳遞的可轉移總水體量。

$$I_{tot}^{t+\Delta t} = \min \left\{ d_o^t A_o, \frac{I_M^t}{W_M^t}, I_{lc}^{t+\Delta t} + I_{tot}^t \right\} \quad (6)$$

$$I_M^t = v_M^t d_o^t \Delta t \Delta e_M \quad (7)$$

式中， $I_{tot}^{t+\Delta t}$: 於 $t + \Delta t$ 中央細胞與鄰域細胞間可轉移水體總量(m³)；
 d_o : 中央細胞水深(m)；
 I_M^t : 權重係數最大的鄰域細胞接收水體量(m³)；
 W_M^t : 鄰域細胞中最大權重係數；
 $I_{lc}^{t+\Delta t}$: 於 $t + \Delta t$ 不發生人工水位震盪的可轉移水體總量(m³)；
 I_{tot}^t : 前一時刻中央細胞與鄰域細胞的可轉移水體總量(m³)；
 v_M^t : 中央細胞與最大權重係數鄰域細胞的最大流速(m/sec)；
 Δe_M : 最大權重係數的鄰域細胞邊緣長(m)。

中央細胞往具最大權重係數之鄰域細胞的最大允許傳遞流速(v_M)由式(8)所得(林吉堃，2018)，其由曼寧方程式(Manning formula)及臨界流方程式計算。

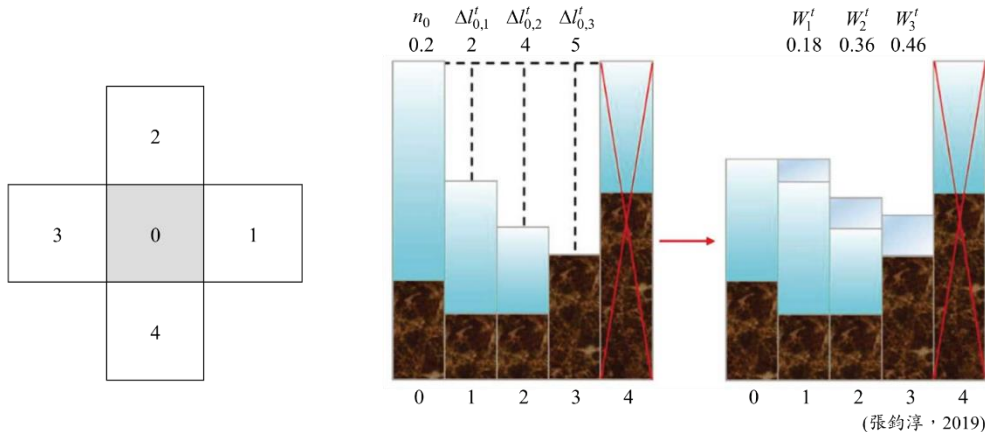


圖 1 細胞權重係數計算舉例示意圖

$$v_M = \min \left\{ \sqrt{d_o^t g}, \frac{1}{n} d_o^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{\Delta I_{0,M}^t}{\Delta X_{o,M}}} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

式中， g : 重力加速度(m/sec²)；
 $\Delta I_{0,M}^t$: 中央細胞與具最大權重係數鄰域細胞水位差(m)；
 $\Delta X_{o,M}$: 中央細胞與具最大權重係數鄰域細胞中心距離(m)。

式(6)中第三項包含了兩項，第一項為不使中央細胞在往鄰域細胞傳遞水體後其水位低於鄰域細胞上升後水位的可轉移水體總量 ($I_{lc}^{t+\Delta t}$)，第二項為前一時刻從此中央細胞往外傳遞的可轉移水體量 (I_{tot}^t)。第二項被納入是為了避免可轉移水體量在時間上出現過大變化。第一項的推導如式(9)所示，當式(9)等式成立時，可導出此條件下的可轉移水體量，如式(10)所示(張鈞淳，2019)。運用式(10)時可先選取最快與中央細胞達相同水位的鄰域細胞，其挑選規則為：從水位差大於 0 之鄰域細胞之中，挑選具有最小水位差者，若最小水位差相等則由具有最小水位差之鄰域細胞再挑選權重係數最大者，以下標 m 表示。

$$I_0^t - \frac{I_{lc}^{t+\Delta t}}{A_0} \geq I_m^t + \frac{1}{A_m} (I_{lc}^{t+\Delta t} W_m^t) \dots\dots\dots(9)$$

$$I_{lc}^{t+\Delta t} = \frac{A_0 (\Delta I_m^t)}{1 + W_m^t} \dots\dots\dots(10)$$

式中， A_m : 最快與中央細胞達相同水位之鄰域細胞面積(m²)；
 W_m^t : 最快與中央細胞達相同水位之鄰域細胞權重係數；
 I_m^t : 最快與中央細胞達相同水位之鄰域細胞水位(m)。

最後，每個鄰域細胞之接收水體量為依式(6)所計算之可轉移水體總量乘以其對應的權重係數，如式(11)所示。

$$I_i^{t+\Delta t} = W_i^t I_{tot}^{t+\Delta t} \dots\dots\dots(11)$$

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(m³)。

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(式(4)~式(11))。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(12)所示(林吉堃，2018)。

$$d_0^{t+\Delta t} = d_0^t - \frac{\sum_i^p I_i^{t+\Delta t}}{A_0} + \frac{\Delta V_0^{in}}{A_0} - \frac{\Delta V_0^{out}}{A_0} \dots\dots\dots(12)$$

式中， $d_0^{t+\Delta t}$: 於 $t + \Delta t$ 時刻中央細胞水深(m)；

$\sum_i^p I_i^{t+\Delta t}$: 鄰域細胞之接收水體量總和(m³)；

ΔV_0^{in} : 中央細胞入流水體量(m³)；

ΔV_0^{out} : 中央細胞出流水體量(m³)；

A_0 : 中央細胞面積(m²)。

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(13)至式(15)式所示(林吉堃，2018)：

$$v_i^{t+\Delta t} = \frac{I_i^{t+\Delta t}}{d_{0,i}^{t+\Delta t} \Delta e_i \Delta t} \forall i \in \{1 \dots p\} \dots\dots\dots(13)$$

$$a = \sum_{i=1}^p v_i^{t+\Delta t} \cos \phi_i, b = \sum_{i=1}^p v_i^{t+\Delta t} \sin \phi_i \dots\dots\dots(14)$$

$$\vec{v}^{t+\Delta t} = (r, \theta) = \left(\sqrt{a^2 + b^2}, \tan^{-1} \frac{b}{a} \right) \dots\dots\dots(15)$$

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；

$\vec{v}^{t+\Delta t}$: 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(16)及式(17)，而更新後的自適應時間步長則如式(18)。

$$\Delta t_{Hunter} = \frac{\Delta x^2}{4} \min \left(\frac{2n}{R^{5/3}} S^{1/2} \right), S > \sigma \dots\dots\dots(16)$$

$$\Delta t_{CFL} = \frac{\Delta x}{v^{t+\Delta t}} \dots\dots\dots(17)$$

$$\Delta t_{min} = \min\{\Delta t_{Hunter}, \Delta t_{CFL}\} \dots\dots\dots(18)$$

式中， Δt_{Hunter} ：Hunter 自適應時間步長(sec)；

Δx ：細胞間之中心距離(m)；

σ ：斜率容差值；

R ：水力半徑(m)；

S ：水面坡度(m/m)；

Δt_{CFL} ：CFL 條件之最小時間步長(sec)；

Δt_{min} ：細胞之最小時間步長(sec)。

而上述式(16)之水力半徑 R 則是由式(19)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。

$$R = \max\{l_0^t - l_i^t\} - \max\{z_0 - z_i\} \dots\dots\dots(19)$$

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(16)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(16)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 雨水下水道模式

本研究以暴雨經理模式(SWMM, Huber *et al.*, 1998)模擬水體在雨水下水道系統內的流動情形。SWMM 模式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，而本研究使用動力波方程式，其如式(20)及式(21)所示(Yen, 1986)：

$$\frac{\partial Q_c}{\partial x} + \frac{\partial A_c}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots(20)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} + \frac{\partial(Q_c^2 / A_c)}{\partial x} + g A_c \frac{\partial h_c}{\partial x} + g A_c S_f + g A_c h_L = 0 \dots\dots\dots(21)$$

式中， Q_c ：管線流量(m³/sec)；

A_c ：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_c ：管線內水位(m)；

S_f ：管線摩擦坡降；

h_L ：單位長度管線損失水頭(m/m)。

式(21)中之摩擦係數由曼寧公式推導可得，如式(22)，而其中給定一斷面之平均速度絕對值，避免在數值計算中平均流速因正負抵消而失去方向性，而式(23)為損失水頭之計算式。

$$S_f = \frac{n_c^2 V_c |V_c|}{R^3} \dots\dots\dots(22)$$

式中， n_c ：曼寧糙度係數(sec/m^{1/3})；

V_c ：管線內斷面之平均流速(m/sec)；

R ：水力半徑(m)。

$$h_L = \frac{K V_c^2}{2g L} \dots\dots\dots(23)$$

式中， K ：損失係數；

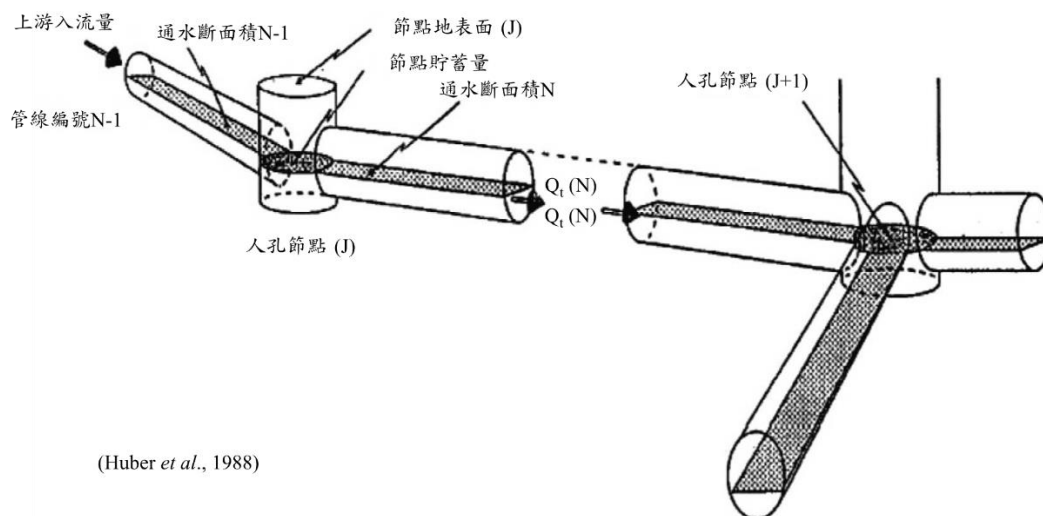
V_c ：管線內斷面之平均流速(m/sec)；

L ：管線長度(m)。

模式中雨水下水道管線內之通水斷面積 A_c 以及水力半徑 R 均為水位 h_c 之函數，而 h_c 可由管線連結之上下游人孔節點水位計算求得，再透過設定適當的起始及邊界條件，即可聯立式(20)及式(21)求解管線流量 Q_c 。

本研究主要採用 SWMM 模式中的幹線輸水模組(Extran Module)，其以人孔節點(Node)-管線(Link)之概念模擬演算水流在雨水下水道系統內流動情形。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；在人孔節點(Node)則是滿足連續方程式以求得節點之水位。人孔節點儲蓄水體特性及管線輸送概念如圖 2 所示。

在管線(Link)的演算方法中，依水流情況可分為滿管流及未滿管流，當流況為滿管流時，該流況主要取決於壓力梯度，其由上下游之壓力水頭所控制，此時通水面積為常數，控制方程式則改以連續方程式與



(Huber *et al.*, 1988)

圖 2 人孔節點及管線輸送演算示意圖

能量方程式，如式(24)及式(25)。在管線上下游端人孔節點之壓力水頭、出入口處的水頭損失係數為已知的情況下，可從式(25)求解管線內之流量，再代入式(24)求得管線內之流速 V_c 。

$$Q_c = A_{cf} \times V_c \dots\dots\dots(24)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} = gA_{cf} \frac{h_{c,u} - h_{c,d}}{L} - (K_u + K_d) \frac{Q_c^2}{2A_{cf}L} - gA_{cf} S_f \dots\dots\dots(25)$$

式中， Q_c ：管線滿管之流量(m^3/sec)；
 A_{cf} ：管線滿管之通水斷面積(m^2)；
 V_c ：管線滿管之平均流速(m/sec)；
 $h_{c,u}$ ：管線上游入口處之壓力水頭(m)；
 $h_{c,d}$ ：管線下游出口處之壓力水頭(m)；
 K_u ：管線上游入口處之水頭損失係數；
 K_d ：管線下游出口處之水頭損失係數。

而人孔節點(Node)於雨水下水道系統而言，其除了有連結管線及集水區出入流控制點之功能外，亦有儲蓄水體之特性。當人孔節點的下游管線無法負荷上游管線的流量時，該人孔水位會因宣洩不及而提高，此時的水位佔據儲蓄水體之功能，但並不會產生人孔溢流情況；反之，當水位超過儲蓄水位時，則會發生溢流現象。人孔溢流量 Q_o 如式(26)所示(Yen, 1986)。

$$Q_o = \sum_i Q_{c,i} + Q_k - A_s \frac{\partial h_c}{\partial t} \dots\dots\dots(26)$$

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_s ：人孔之截面積(m^2)；
 h_c ：人孔水位(m)。

人孔節點亦可分為兩種流況，分別為滿管及未滿管。當輸水管線及人孔節點均為未滿管時，該人孔點之溢流量 Q_o 為零，則式(26)則簡化成式(27)，此時連接人孔節點之管線流量 $Q_{c,i}$ 與地表集水區集流器入流量 Q_k 均為已知條件，可由式(27)求解人孔之水位 h_c 。

$$\frac{\partial h_c}{\partial t} = \frac{1}{A_s} \left(\sum_i Q_{c,i} + Q_k \right) \dots\dots\dots(27)$$

當人孔節點與輸水管線均為滿管時，式(27)中有 h_c 及 Q_o 兩個未知數，此時人孔節點改由式(28)計算，先求得人孔溢流量 Q_o 後，再以式(29)建立人孔節點之水位變量 Δh_c 及流量 $Q_{c,i}$ 、 Q_k 、 Q_o 之間的關係(陳宣宏，2002；王軒賀，2009)。

$$Q_o = \sum_i Q_{c,i} + Q_k \dots\dots\dots(28)$$

$$\sum_i Q_{c,i} + Q_k - Q_o + \sum_i \frac{\partial Q_{c,i}}{\partial h_c} \Delta h_c = 0 \dots\dots\dots(29)$$

透過上述計算可得人孔節點之水位變量 Δh_c ，並進而求得人孔節點水位 h_c 。當人孔節點水位未超出地表高程時，則因人孔節點之儲蓄功能而不產生溢反之，當人孔節點水位高於地表高程時，則發生溢流之情形並計算人孔節點溢流量 Q_o ，再以點源之方式進入二維漫地流模式來進行漫地流的模擬，如圖 3 所示。

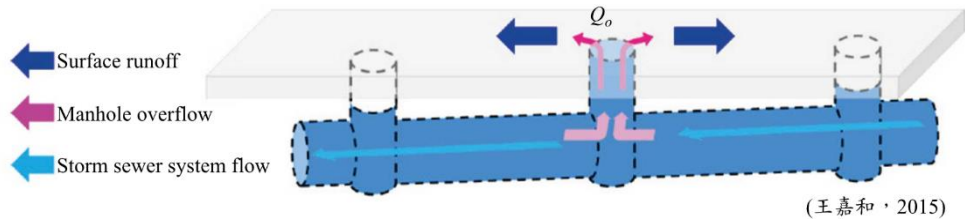


圖 3 人孔溢流示意圖

2.3 進水口與連接管模組

因為 SWMM 主要是為了進行下水道分析，因此缺乏地表進水口的設置，本研究因此開發地表水的進水口模組，以堰流公式與孔口流公式進行分析，如式(30)所示。

$$Q_h = \begin{cases} Q_w = C_w P h^{\frac{3}{2}}, h \leq 0.23 \\ \min\{Q_d, Q_w\}, 0.23 < h < 0.55 \\ Q_d = C_d A \sqrt{2gh}, h \geq 0.55 \end{cases} \quad (30)$$

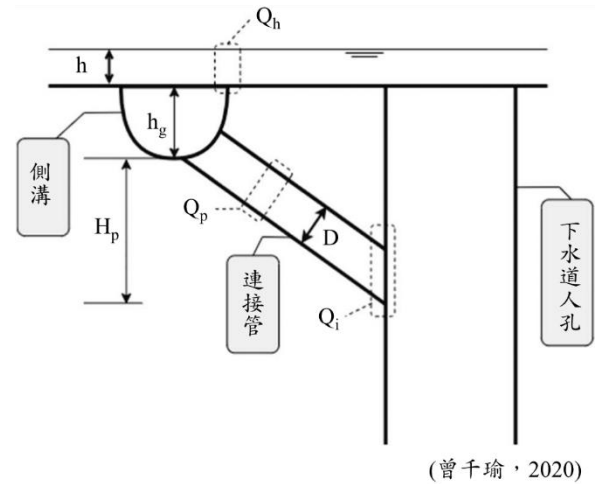
式中， Q_h ：道路進水口入流量(m^3/sec)；
 Q_w ：道路進水口堰流型式之入流量(m^3/sec)；
 C_w ：堰流係數；
 P ：集流器之周長(m)；
 h ：水深(m)；
 Q_d ：道路進水口孔口流型式之入流量(m^3/sec)；
 C_d ：孔口流係數；
 A ：集流器之面積(m^2)。

道路進水口的流量計算參考 Flo-2D Pro 軟體中格柵進水口之設定(O'Brien, 2012)，地表逕流流經進水口並進入雨水下水道系統之入流情況主要分為孔口流及堰口流兩種型式，並依據地水深判斷入流量，當地表水深小於 0.23 公尺時，此時流經進水口的水流型式為堰流；當地表水深大於 0.55 公尺時，此時水流之型式則為孔口流，而水深介於 0.23 公尺至 0.55 公尺之間則取兩者流量較小者。

在決定道路進水口入流量之後，再透過連接管效應導入雨水下水道系統內，而連接管效應採用靜水壓原理來描述，如式(31)，其中連接管管徑為 0.6 公尺、側溝高度為 0.4 公尺及側溝底部至人孔入流處高度為 1 公尺，上述數值皆依據臺北市市區道路工程設計規範設置。排水設施側視圖如圖 4 所示。

$$Q_p = C_p \frac{D^2}{4} \sqrt{2g(h_g + H_p)} \quad (31)$$

式中， Q_p ：連接管入流量(m^3/sec)；



(曾千瑜，2020)

圖 4 排水系統側視圖

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 檢定驗證評估指標

本研究為了評估淹水模式的模擬結果，利用偵測率作為評估之方式，其中預測為有，也有觀測到即定義為“True positive” (TP)；預測為無，但有觀測到為“False negative” (FN)。而偵測率 (Probability of Detection, POD)係描述在實際有發生的事件當中，有預測到的比例，其計算方法如式(32)所示：

$$POD = \frac{TP}{TP + FN} \quad (32)$$

偵測率的數值範圍為 0 至 1，越接近 1 代表模式預測有發生事件的能力越好，而 1 則達到完全的偵測率。因偵測率只針對觀測淹水範圍內的模擬結果做評估，因此不會受到 TN 的影響，但由於偵測率未考慮 FP (觀測無淹水但模擬有淹水之區域)，故無法考慮到淹水模式的模擬結果有高估的情況。

三、研究區域概述與資料蒐集

本研究以臺北市為研究區域，蒐集臺北市水文、地文以及排水設施相關資料，包括觀測雨量站雨量資料、QPESUMS (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor) 預報雨量資料、數值高程模型資料、土地利用資料、道路街廓資料、雨水下水道人孔位置配、雨水下水管道線配置、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

本研究所建立的預報平台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，其資料包括雨量站即時資料與雨量站歷史資料，且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 83 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 5 所示。預報降雨部分，採用 QPESUMS 降雨預報，其網格解析度為 0.0125 度(約 1.25 公里)，如圖 6 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



圖 6 QPESUMS 降雨預報網格圖

誤差，因此後續僅採用 QPESUMS 對於未來兩小時的預報雨量結果。

3.2 雨水下水道相關資料、數值地形高程與土地利用資料

在雨水下水道資料部分，臺北市雨水下水道管線等相關資料如圖 7 與圖 8 所示，管線共計 15,443 條，

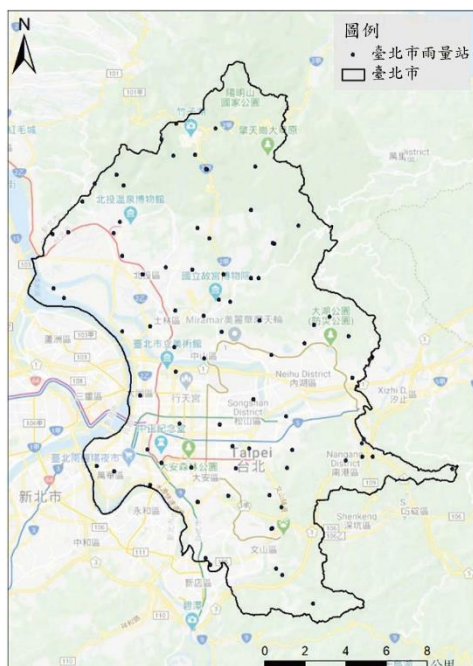


圖 5 選用雨量站位置圖

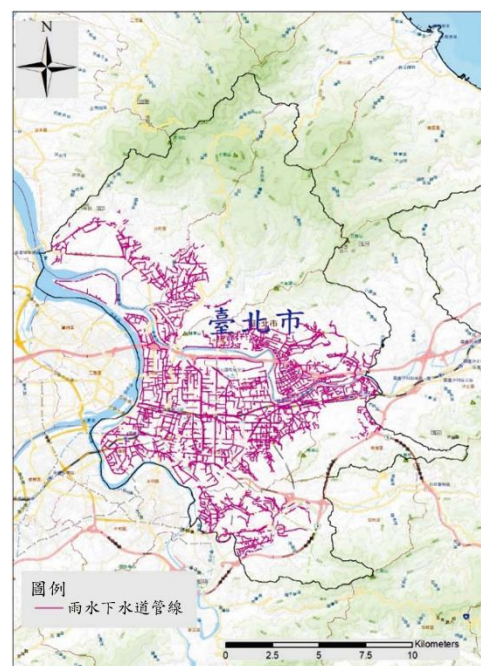


圖 7 管線位置圖

總長度約 662 公里，人孔分布位置總計 16,936 點。數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)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。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、公共設施、遊憩、礦業與其他，如圖 1 所示。

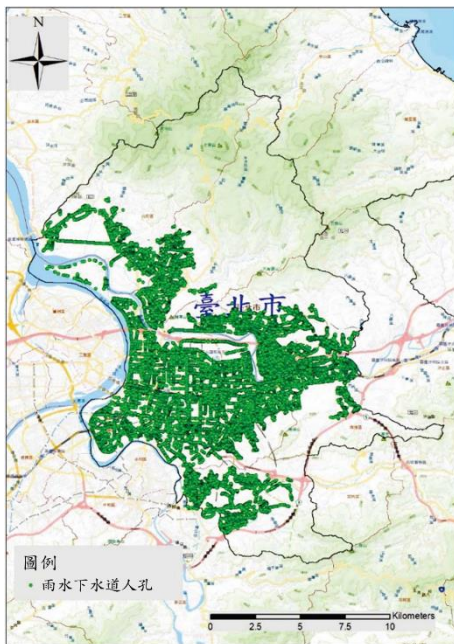


圖 8 人孔位置圖

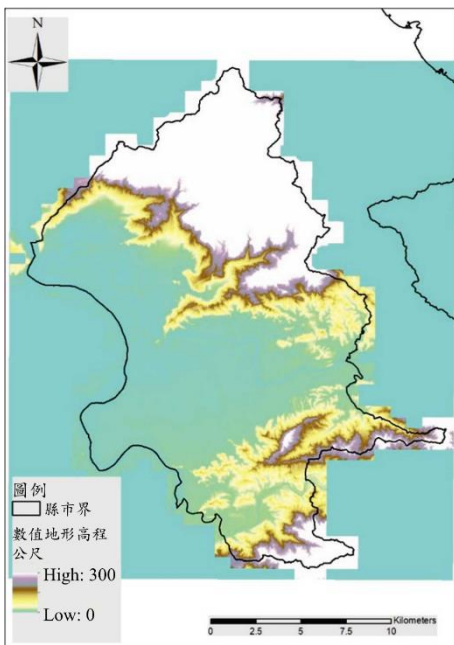


圖 9 數值高程模型圖

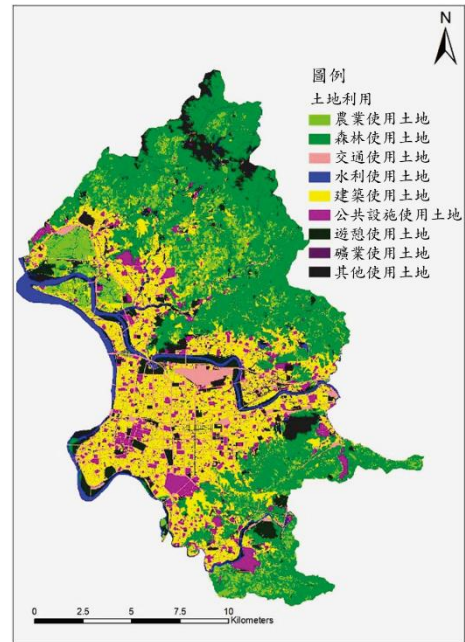


圖 10 土地利用圖

四、模式建置及淹水評估

4.1 降雨情境設定

本研究使用之雨量資料設置方法為徐昇氏多邊形分區法給予雨量設置，各雨量站控制的範圍以徐昇分區進行判斷，如圖 11 所示，同一分區內給予此雨量站雨量資料。在預報雨量的處理上，由於預報雨量為網

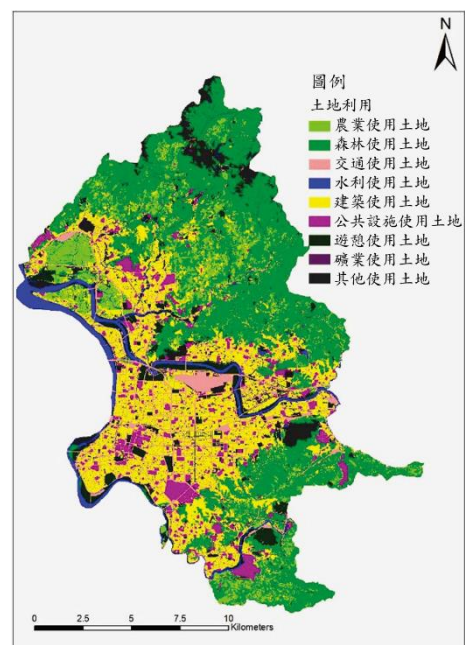


圖 11 預報雨量網格與徐昇分區關係圖

格資料，其與雨量站分佈有所不同，因此為了統一模式中的雨量輸入資料，利用雨量站徐昇分區中具最大雨量的網格代表此分區的雨量輸入值。

4.2 降雨逕流集流設定

山區部分，本研究依據雨水下水道分區進行分析，於山區無雨水下系統之區域依據面積、特徵長度、坡度等因子進行 SWMM 山區降雨逕流分析。在建築部分上，本研究依據 Chang *et. al.* (2015) 的設定方式，將建築區塊之二維網格依據雨水下水道集流分區直接將雨量導入雨水下水道系統之中。

道路部分，本研究之道路進水口設置依據臺北市市區道路工程設計規範，沿著道路以五公尺至十公尺之間隔設置格柵直落式進水口。由於本研究使用 10 公尺解析度之數值地形高程資料，因此有包含到道路的網格均設置進水口入流效應，如式(30)，又因為道路寬度有小於 10 公尺與大於 10 公尺者，因此將進水口入流效應依據道路寬度分配至道路網格之中，其概念如圖 12 所示。假設格柵直落式進水口地設置間隔為五公尺一

個，並假設一個進水口面積為 0.24 平方公尺(0.6×0.4)、周長 2 公尺、集流效應為 Q_i ，則於 10 公尺寬道路設置雙邊進水口共 4 個(總集流效應為 $4Q_i$)，小於 10 公尺寬道路設置單邊進水口共 2 個(總集流效應為 $2Q_i$)，10 公尺寬以上道路設置雙邊進水口共 4 個(總集流效應仍為 $4Q_i$)。以 20 公尺寬道路為例，各道路網格的集流效應為 $2Q_i$ ，此值為 10 公尺寬道路下各道路網格集流效應($4Q_i$)的一半；以此類推，30 公尺寬道路下各道路網格集流效應($=4/3Q_i$)為 10 公尺寬道路下的各道路網格的三分之一。

在本研究中，由進水口進入的水量會直接利用連接管效應進入雨水下水道人孔中，其中忽略側溝效應。連接管效應係利用靜水壓以及連接管管徑進行評估，其流量如式(31)計算，而相關所需尺寸則依據臺北市市區道路工程設計規範，集水井與人孔間之連接管不得小於 60 公分，集水井與集水井間之連接管不得小於 50 公分，U 型溝深度不得小於四十公分。本研究將連接管管徑定為 0.5 公尺，逕流係數 C_p 取為 0.5，側溝高度 h_g 為 0.4 公尺，側溝底部至人孔入流處高度 H_p 為 1 公尺，此時依照式(31)所算出之側溝滿管狀態下

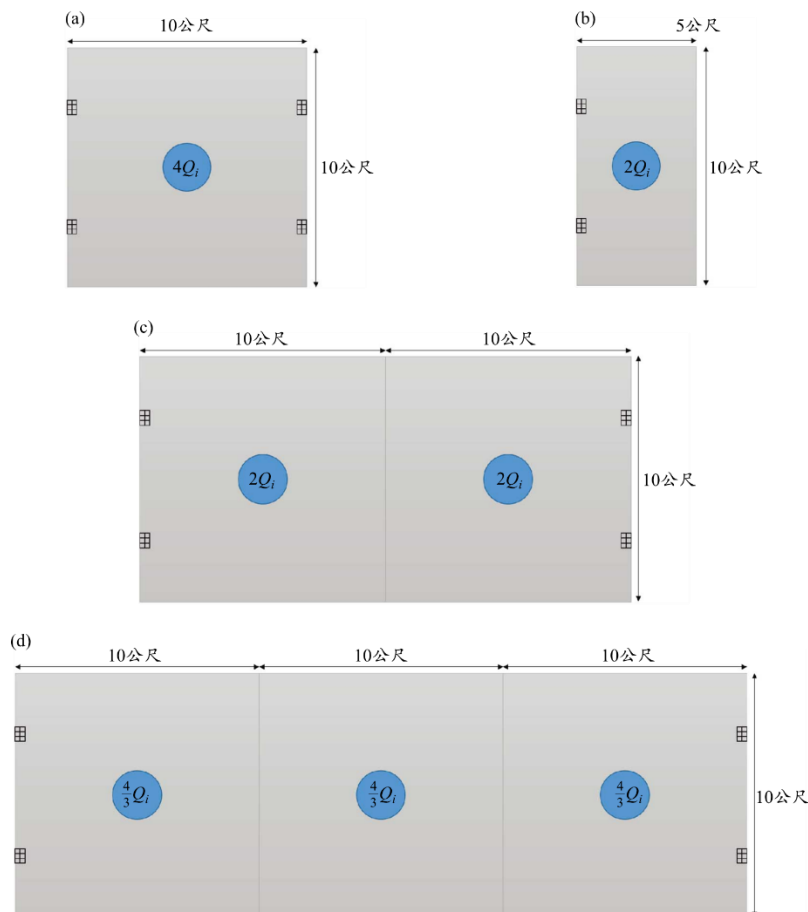


圖 12 道路進水口設置示意圖

的連接管效應 Q 為 $0.5145 \text{ m}^3/\text{sec}$ 。在假設一個人孔連接 3 個連接管的條件下，依照人孔集流分區可將此值作為流量限制條件分配到此人孔涵蓋的道路進水口，例如此人孔涵蓋了 10 個道路進水口，則每個進水口的連接管效應為 $0.5145 \times 3 \div 10 = 0.15435 \text{ m}^3/\text{sec}$ 。

當進水口入流量小於連接管效應流量時，街道依據進水口入流量進入雨水下水道人孔中，當進水口入流量大於連接管效應流量時，街道依據連接管效應流量進入雨水下水道人孔中，而其餘水量留在街道網絡進行地表漫地流。

4.3 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 83 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 1,774,463 個網格。本研究計畫以河川集水區分區、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，而山區逕流部分與建物區塊如圖 13 所示。本研究所建立的即時淹水預報平台係運用

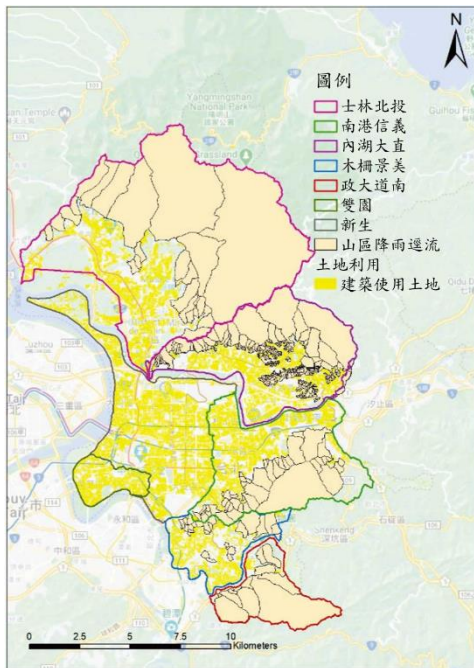


圖 13 集水分區圖

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。

4.4 歷史淹水事件模擬

本研究以 2015 年 0614 豪雨、2017 年 0602 豪雨、2018 年 0908 豪雨與 2020 年 0529 豪雨等事件進行都會區快速淹水模擬測試，其四場豪雨事件最大 60 分鐘雨量以及發生雨量站如表 1 所示。2015 年 0614 豪雨事件主要淹水區域為臺大基隆路一帶與成功國宅周邊；2017 年 0602 豪雨事件主要淹水區域為小巨蛋周邊、赤峰街周邊、合江街周邊、大湖山莊周邊、福林路-士林捷運站周邊；2018 年 0908 豪雨事件主要淹水區域為臺大基隆路一帶、小巨蛋周邊、大安森林公園周邊、成功國宅周邊；2020 年 0529 豪雨事件主要淹水區域為木柵路二段與興隆路四段路口一帶，如圖 14 至圖 17 所示，各區域模式偵測率如表 2 所示，由圖 14 至圖 17、表 1 與表 2 可知結合細胞自動機與雨水下水道之都會區快速淹水模式具有快速且正確的評估成效。

表 1 歷史淹水事件雨量表

事件	雨量站	行政區	60 分鐘雨量 (mm)	模擬時間
2015 年 0614 豪雨	公館	大安區	131.5	10.7
2017 年 0602 豪雨	竹湖	北投區	111.0	13.9
2018 年 0908 豪雨	挹翠	信義區	138.0	15.8
2020 年 0529 豪雨	埤腹	文山區	81.5	6.7

表 2 歷史淹水事件區域分析表

事件	區域	偵測率 (%)
2015 年 0614 豪雨	臺大基隆路一帶	70.8
	成功國宅周邊	64.1
2017 年 0602 豪雨	小巨蛋周邊	61.5
	赤峰街一帶	61.0
	合江街一帶	95.1
	大湖山莊周邊	65.1
	福林路/士林捷運站周邊	75.2
2018 年 0908 豪雨	臺大基隆路一帶	69.8
	小巨蛋周邊	67.1
	大安森林公園周邊	70.4
	成功國宅周邊	78.9
2020 年 0529 豪雨	木柵路二段與興隆路四段路口一帶	74.8

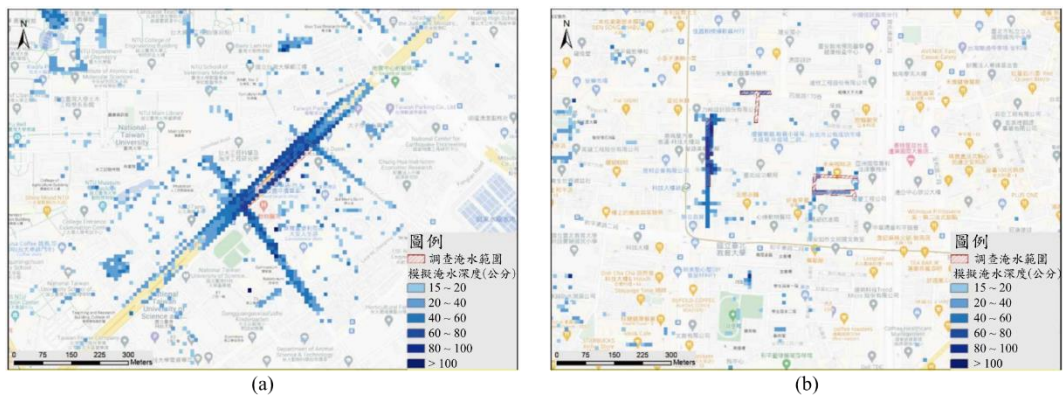


圖 14 2015 年 0614 豪雨事件，淹水模擬結果圖(a)臺大基隆路一帶(b)成功國宅周邊

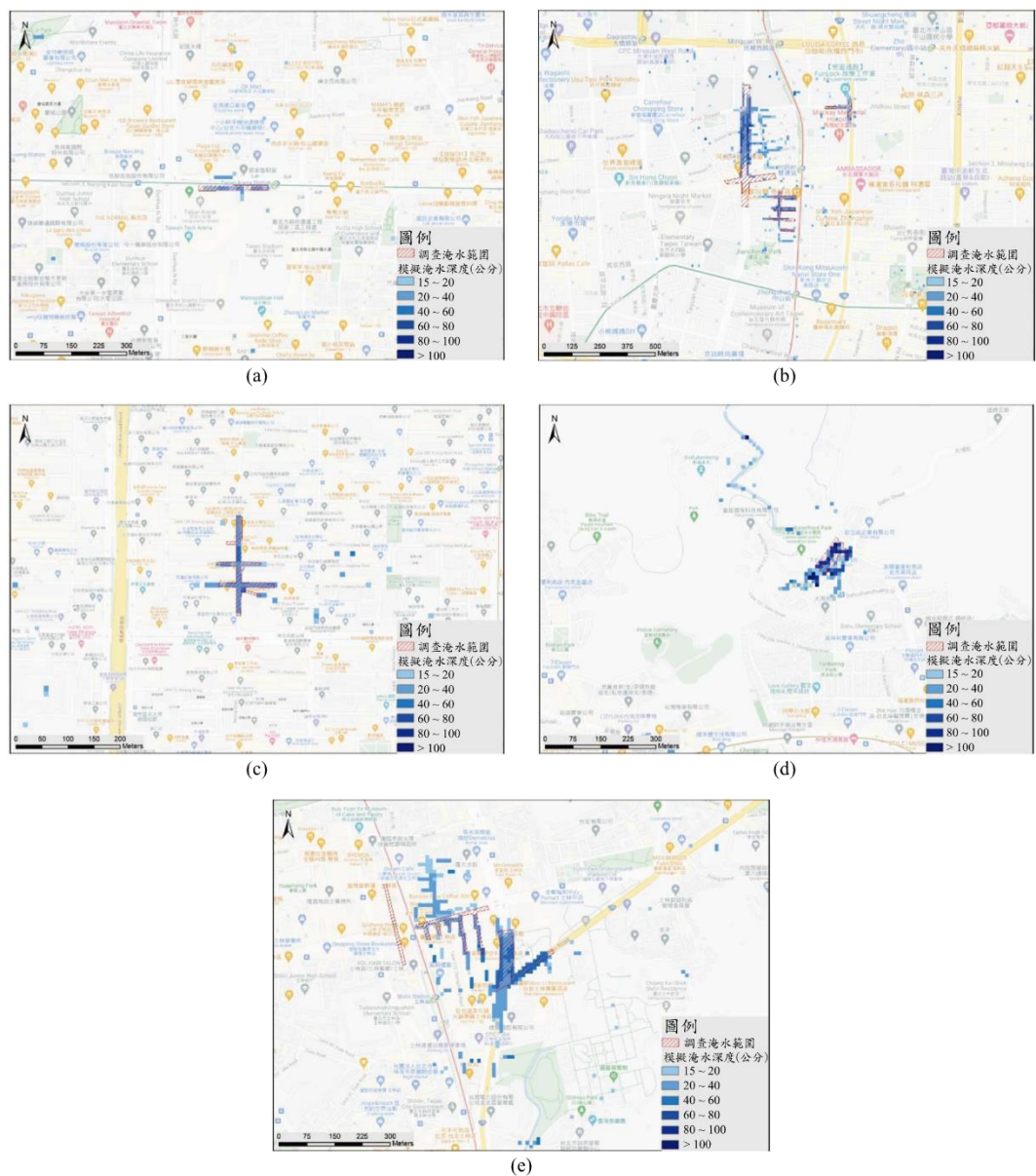


圖 15 2017 年 0602 豪雨事件，淹水模擬結果圖(a)小巨蛋周邊(b)赤峰街周邊(c)合江街周邊(d)大湖山莊周邊(e)福林路/士林捷運站周邊

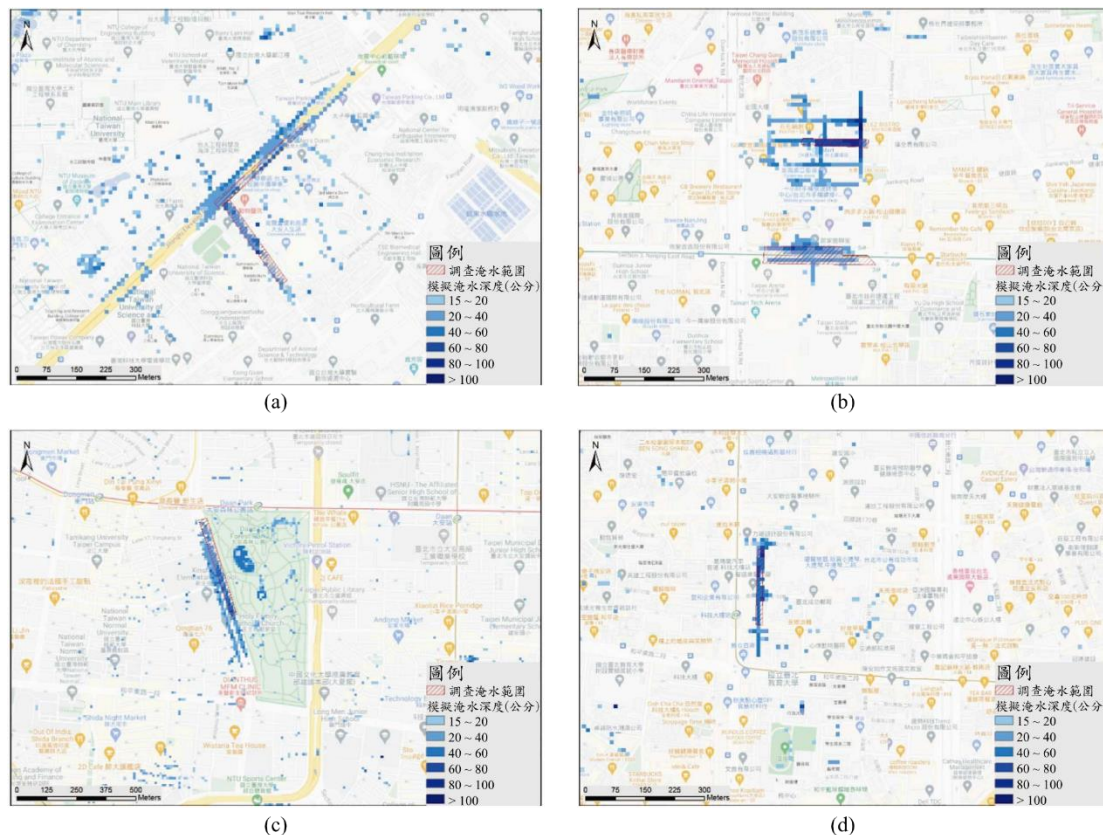


圖 16 2018 年 0908 豪雨事件，淹水模擬結果圖(a)臺大基隆路一帶(b)小巨蛋周邊(c)大安森林公園周邊(d)成功國宅周邊

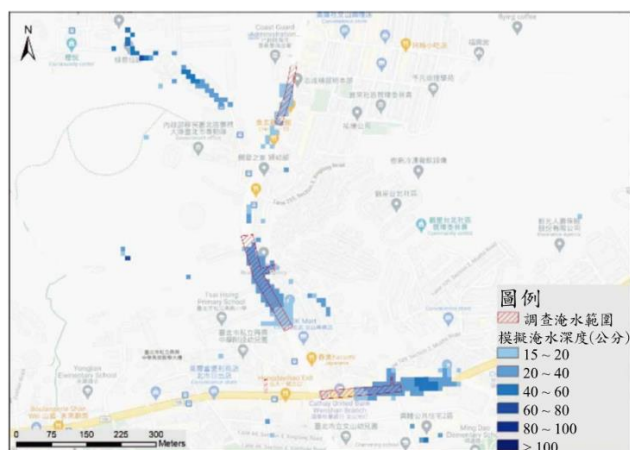


圖 17 2020 年 0529 豪雨事件，淹水模擬結果圖：木柵路二段與興隆路四段路口一帶

4.5 即時淹水模擬

本研究以前述通過歷史事件測試的都會區快速淹水模式為基底，建構自動化程式自動撈取觀測雨量、預報雨量等數據，並且會自動將前述資料進行轉檔來啟動都會區快速淹水模式，並在完成模擬後自動將結

果轉為平台所支援之展示格式。此平台以排程之方式自動以 30 分鐘一次的頻率進行即時淹水模擬，其輸入的雨量資料為過去 4 小時雨量站觀測雨量以及未來 2 小時 QPESUMS 降雨預報結果。本研究於 2020 年 8 月哈格比颱風、0811 豪雨以及 0827 豪雨等三場颱風豪雨事件均可以提前 30 至 60 分鐘評估出積淹水位置。

2020 年哈格比颱風事件下 11:00 預報積淹水模擬圖如圖 18 所示，圖 18 為利用 07:00 至 11:00 時之觀測雨量以及 11:00 至 13:00 時之預報雨量之積淹水評估結果。本團隊所建立的淹水預報平台已完全自動化，

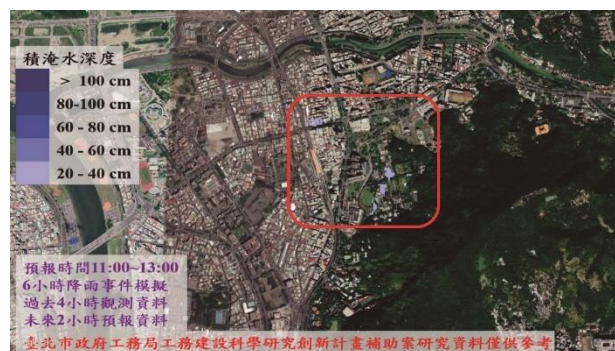


圖 18 2020 年哈格比颱風事件 11:00 預報積淹水圖

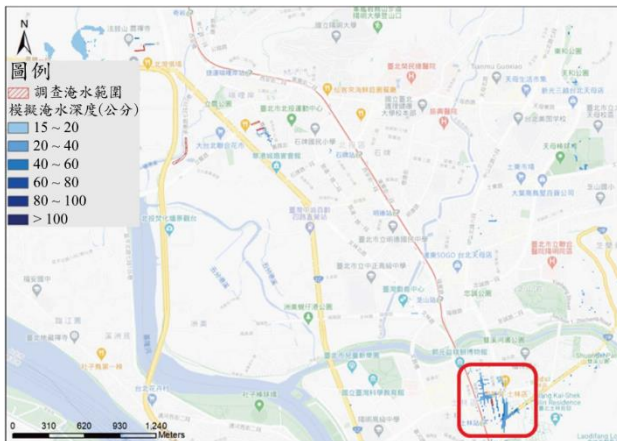


圖 19 2020 年哈格比颱風事件，實際雨量模擬圖

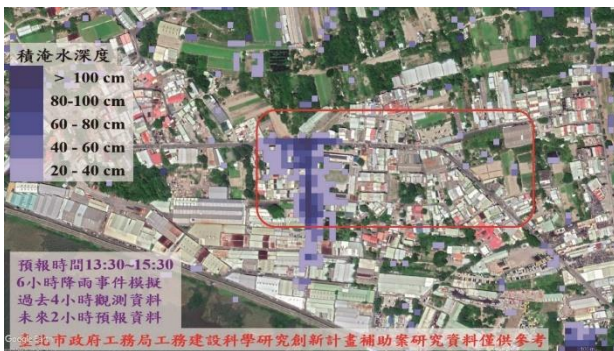


圖 20 2020 年 0811 豪雨事件，13:30 預報積淹水圖



圖 21 2020 年 0811 豪雨事件，實際雨量模擬圖

可每 30 分鐘自動執行與產出未來 2 小時可能之積淹水區域與深度(如 <https://storage.googleapis.com/taipei-2020/web/index.html> 所示)；而圖 19 為哈格比颱風事件時士林地區實際降雨事件(降雨時間為 07:00 至 19:00 時，共 12 小時)之積淹水時間評估結果，模式模擬時間約為 20.2 分鐘，而積水時間約發生 11:30~13:00 之間

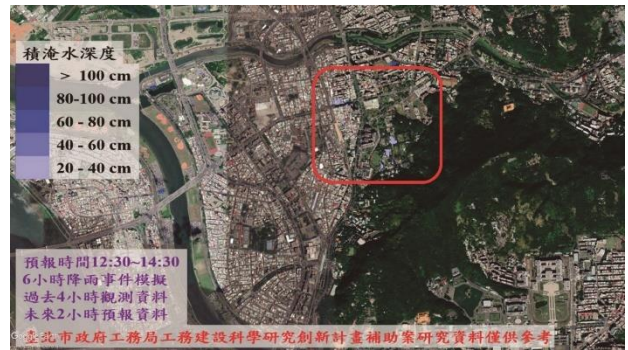


圖 22 2020 年 0827 豪雨事件，12:30 預報積淹水圖



圖 23 2020 年 0827 豪雨事件，實際雨量模擬圖

(參考臺北市積水資訊網)，此平台於 11:00~11:30 就能預報出積淹水情況。

2020 年 0811 豪雨事件下 13:30 預報積淹水模擬圖如圖 20 所示，圖 20 為利用 09:30 至 13:30 之觀測雨量以及 13:30 至 15:30 時之預報雨量之積淹水評估結果；而圖 21 為 0811 豪雨事件時社子地區實際降雨事件(降雨時間為 13:30 至 16:30 時，共 3 小時)之積淹水時間評估結果，模式模擬時間約為 6.2 分鐘，而積水時間約發生 14:00~14:40 之間(參考臺北市積水資訊網)，本研究發展的預報平台於 13:30~14:00 就能預報出積淹水情況。

2020 年 0827 豪雨事件下 12:30 預報積淹水模擬圖如圖 22 所示，圖 22 為利用 08:30 至 12:30 之觀測雨量以及 12:30 至 14:30 時之預報雨量之積淹水評估結果；而圖 23 為 0827 豪雨事件時社子地區實際降雨事件(降雨時間為 11:00 至 17:00 時，共 6 小時)之積淹水時間評估結果，模式模擬時間約為 9 分鐘，而積水時間約發生 12:30~13:30 之間(參考臺北市積水資訊網)，本研究建立的預報平台於 12:30~13:00 就能預報出積淹水情況。

由以上結果可知本研究所建構的即時淹水預報平台可正確且快速的提供淹水預警。

五、結論

本研究利用臺大細胞自動機快速淹水模式(NTU-CAFIM)與暴雨經理模式(SWMM)進行耦合，並加入進水口、連接管效應與建物排水等機制，來增加積淹水模擬的偵測率，並建構臺北市強降雨即時淹水預報平台，增加其應用性與即時性。本研究利用實際雨量站觀測資料以及 QPESUMS 預報雨量資料來進行快速都會區淹水評估，均能在 30 分鐘內完成全臺北市的 10 公尺解析度的淹水模擬。再以 4 場歷史事件以及 2020 年 8 月 3 場事件分別進行歷史與即時積淹水評估，有關本研究之結論可歸納如下。

本研究於模式之中加入進水口、連接管效應與建物排水等，可以有效且正確地評估降雨事件下路面積淹水情況，評估出降雨強度過強路面進水口與側溝連接管排水不及的情況。在 4 場 60 分鐘雨量皆超過八十的歷史積淹水事件下均能在 20 鐘內完成全臺北市的積淹水模擬，並且皆仍能維持不錯的偵測率約為 60 %以上。

在即時積淹水評估方面，本研究所建構的預報平台利用過去 4 小時雨量站觀測雨量以及未來 2 小時 QPESUMS 降雨預報來自動進行模擬，且可以每 30 分鐘即進行一次的即時淹水模擬預報，於有效的降雨預報情況下均能預報出易淹水區域的積淹水情況，以 2020 年 8 月三場颱風豪雨事件為例，本研究所發展的預報平台均能提前 30~60 分鐘預報出積淹水情況與位置。

誌謝

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得以順利完成階段性成果，並持續精進與推廣應用，其網站為『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』，網址如下：<https://storage.googleapis.com/taipei-2020/web/index.html>。在本研究執行期間，承蒙彭副市長振聲、陳處長郭正、張總工程司凱堯、林參議士斌、林科長洙宏、劉科長柏廷、李股長貞德等人，提供所需資料與技術支援，並且與本團隊進行觀念討論，讓研究成果更為豐碩，謹致謝忱。

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. Ghimire, B., Chen, A. S., Guidolin, M., Keedwell, E. C., Djordjević, S., Savić, D. A. (2013). Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 676-686.
4. Guidolin, M., Chen, A. S., Pasquale, N. (2015). CADDIES: caflowd application user guide.
5. 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.
6. 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.
7. Huber, W. C. and Dickinson, R. E. (1988). Storm Water Management Model, User's Manual Ver. IV, U.S. EPA.
8. 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.
9. O'Brien, J. S. (2012). FLO-2D User Manual Version 2009, FLO-2D EPA SWMM Guidelines.
10. Yen, B. C. (1986). Hydraulics of Sewers. *Advances in Hydroscience*, 14, 1-123.
11. 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。
12. 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。
13. 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。
14. 張鈞淳，2019 年，地表曼寧糙度值對都會區快速淹水

模擬模式之影響，國立臺灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。

15. 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。
16. 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。