

複合性災害評估架構研究：莫拉克風災為例¹

張學聖²、廖晉賢³

論文投稿日期：101年12月12日
第一次修正日期：102年07月10日
第二次修正日期：102年09月25日
論文接受日期：102年11月29日

摘要

在人類傾力與自然環境共處之際，極端氣候事件仍造成全球重大災害與損失，新興災害防治與評估研究為重要課題之一。本文以莫拉克風災為例，探討複合災害評估架構，輔以空間統計、災害關聯之損失推估與災害規模分析，藉由台南曾文溪流域進行案例研究。驗證分析結果顯示，首先在災害空間特性部分，各類型災害在上游與下游均有明顯的地域性群聚特徵；其次在災損特性上，複合災害次數與災害總損失間呈現高度關係；最後在不同空間尺度敏感性分析下，莫拉克各類災害空間關聯現象亦呈現顯著性。本文成果希冀能提供未來韌性都市面對複合災害影響關係的科學論證參考。

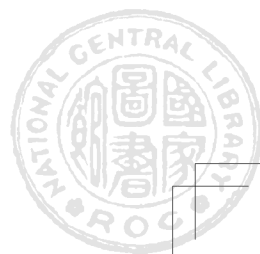
關鍵詞：韌性都市、複合災害、空間統計、空間尺度

DOI: 10.6128/CP.41.3.305

1. 本文接受行政院科技部專題研究計畫「從複合性災害探討集水區聚落規劃空間調適策略研究—以曾文溪流域為例」補助之部分研究成果 (NSC 101-2420-H-006-005-MY3)。
2. 國立成功大學都市計劃學系副教授，E-mail: changhs@mail.ncku.edu.tw。
3. 國立成功大學都市計劃學系博士候選人，E-mail: krien3082@hotmail.com。

1018-1067/10

中華民國都市計劃學會 民國一百零三年
©2014 Taiwan Institute of Urban Planning



Assessment Framework for a Compound Disaster: A Case Study of Typhoon Morakot

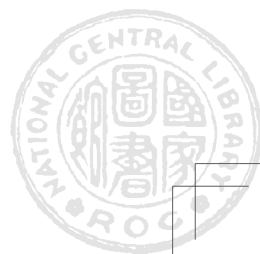
Hsueh-Sheng Chang and Chin-Hsien Liao

*Department of Urban Planning, National Cheng Kung University
Tainan, Taiwan 70101*

ABSTRACT

In a time where humanity increasingly must make an effort to live harmoniously in the natural world, the global toll from extreme natural events has become an important issue in disaster prevention and assessment. This study introduces the assessment framework for compound disasters with the spatial statistical model of compound disaster damage assessment and natural hazard scales to respond to the disaster management strategies. The study methodology has been tested using the Zengwun River catchment in Tainan, Taiwan as a case study. First, both upstream and downstream are the most local spatial areas for aggregation of a compound disaster; secondly, a line correlation exists between the number of compound disasters and total losses from such disasters. Finally, the significant correlation of spatial scale has been demonstrated to be remarkable. This paper also estimates the condition of disaster prevention and assessment under the relationship between compound disasters and hierarchical effect based on the resilient city of the assessment framework of compound disaster.

Keywords: Resilient city, Compound disaster, Spatial statistics, Spatial scale

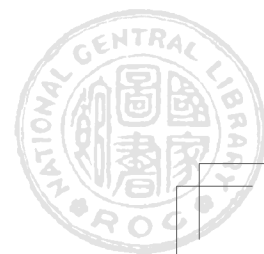


一、前言

近年來國際上因氣候變遷，導致全球災害發生的頻率逐漸增高，更產生複合災害且嚴重衝擊許多地區或國家。如泰國水災產生嚴重的人為災害影響、東日本大地震所造成的海嘯引發核災危機、台灣莫拉克風災致使小林村被山崩、土石流活埋等慘痛經驗，引發許多新興複合災害的防治課題。複合災害若將它比擬為人類文明進步的代價，其挑戰是不斷測試環境系統門檻極限，並考驗都市環境所能承擔的受災風險 (Disaster risk) 與都市韌性 (Urban resilience) 問題。在價值觀上進一步解讀複合災害的影響，除了歸類災害所產生空間擴散和時間間隔下的複合狀態與災損特徵，其亦詮釋人類境況與災害關係的一種觀點。

早期 Ian *et al.* (1993) 於「The environmental as hazard」一書中提出：「特定國家面對多種災害，期望是否能設計出一套全面性的措施進行多元複合危害管理 (combined multihazard management)，開啓複合災害相關研究之里程碑。而台灣在2009年莫拉克風災後，也積極針對複合災害的防治策略、體系與管理面向進行檢討與因應。如國家災害防救科技中心 (2010) 提出「莫拉克颱風之災情勘查與分析」報告等；行政院國家科學委員會 (2011) 提出「台灣氣候變遷科學研究報告」。綜合上述回顧可發現，台灣過去針對複合災害之計畫層次，已從解析自然空間與時間現象下的災防預警應變，逐漸深化考量各區域其社經衝擊與都市受災經驗門檻的因應反饋學習過程，進而提供規劃非工程性減災與調適策略之參考。若以韌性都市觀點 (Brand and Jax, 2007; Christopherson *et al.*, 2010; Davoudi *et al.*, 2012) 所主導的空間規劃思維，主要嘗試透過複合災害影響與量測，提供複合災害相關研究科學與規範性規劃程序的基礎評估架構。

過去複合災害量測之相關研究仍屬起步階段，若從複合災害在本質與影響過程進行相關研究領域的解析可發現，由於複合災害存在時間與空間上的獨特性，且各系統間彼此鏈結著所衍生二次災害的發生，並以乘數效果擴及其規模與力度 (Salzano and Cozzani, 2012)，相對也造成政府在執行減災與應變上的複雜性，最終對於都市發展之容受力進行檢討 (Chen and Graham, 2011)，做為複合災害減災應變之借鏡。從上述之說明，複合災害的量測存在複雜性，除了需結合自然、工程與地理學領域專業進行災害現象的探索，輔以自然現象的探索與環境工程監測建議、災害潛勢模擬與預報警等相關研究，解析災害現象的時間間隔與空間分布 (曾國源、張斐章，2006；傅金城等人，2010；王金山等人，2011)；又需透過災害管理與風險量測方法討論其承受與損害關係，如以洪災風險與複合災害風險評估之研究，檢討災害事件可以直接或間接的損害生命財產進行風險評估的關係研究 (詹士樑等人，2003；洪鴻智、陳玲怡，2007；陳禹銘等人，2009；李欣輯等人，2010)；亦有嘗試以災害歷史經驗評估易致災都市空間發展、洪災脆弱度 (陳亮全、陳海立，2007；吳杰穎、黃昱翔，2011) 與自然災害規模 (natural hazard scales) 的評定如芮氏地震強度 (Richter scale)、火山爆炸指數 (volcanic



explosivity index)、薩菲爾 - 辛普森颶風強度指數 (saffir-simpson scale) 與洪災強度 (magnitude of storm surge) 等方法 (Greenhalgh and Parham, 1986; Feng and Luo, 2010)，做為未來韌性都市下所應具備災防經驗門檻與反饋學習的準則。

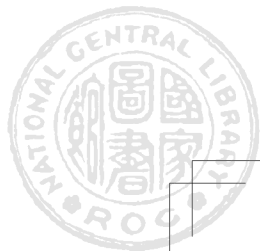
有鑑於此，本文首先透過文獻回顧對於複合災害本質與影響進行釐清，再者透過敘述統計與空間統計解析複合災害的空間現象與結合災害關聯之損失推估經驗公式，分析複合災害所造成鏈結與乘數關係的損害結果。其次參考 Feng and Luo (2010) 洪災量化強度模型架構，嘗試建立台灣複合災害量測模式。最後結果希冀作為未來都市政策引導土地使用規劃與管制之參考。全文包含前言、複合災害思維與討論、複合災害評估架構設計、驗證初探與結論與建議，詳述如下。

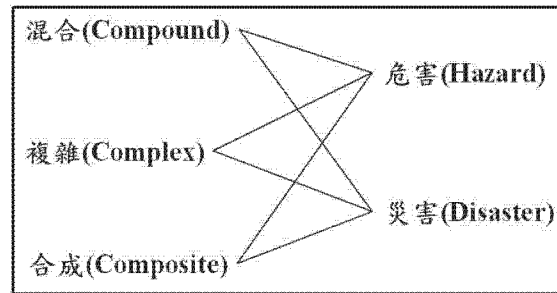
二、複合災害思維與討論

本段從複合災害本質、複合災害影響與複合災害量測等進行回顧，以統整回應複合災害之量測模式，論述如下：

(一) 複合災害本質

「複合災害」在專有名詞上仍無明確且共識之統一定義。吾人嘗試透過字根的定義，試圖解釋其複合災害本質與過程中所產生的諸多問題。首先在字根上「複合」在教育部國語字典為「結合在一起」的意思。而「複合」在漢英字典解釋上區分為三類：1. Compound 代表兩種元素以上所混合的複合物類似屬於化學關係；2. Complex 由各種部分所建構錯縱複雜的問題關係；3. Composite 多種條件所共同合成的結果關係。綜合上述，「複合」之意義暗喻一種元素與條件關係，所鏈結著各類問題導向下的最終結果。另外在災害的討論，依據災害管理學辭典所示，「災害」涵括了英文的 Hazard 與 Disaster 兩者，Hazard 為潛在危險或有害狀況的來源，在此以「危害」做區別；Disaster 係指一連串社會機能的崩解，導致人類、經濟或環境的損失，並超過社會資源所能應付之狀況以「災害」表示。上述兩者歸納，「危害」與「災害」之區別廣義在於事件發生時，各類事件之間是否衝擊影響於其它事件而造成經濟損害發生稱為災害，反之無損害發生稱為危害。而複合之概念在於評估事件之損害與衝擊所產生的「災害」影響，為本文之焦點，如圖一。然複合之概念在實質操作上要將複合關係明確區分，存在資料限制之困境，也造成本文在研究論證的許多限制。故本文所界定之複合災害，關注於颱風所造成各類災害複合效果所導致環境與經濟損失及空間現象評析，期盼給予後續複合性災害本質討論的立論基礎。



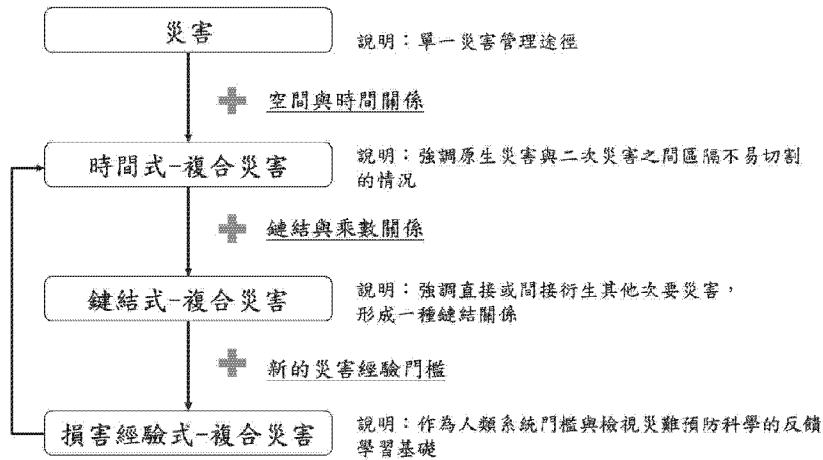


圖一 複合災害本質關係圖

(二) 複合災害影響

本文透過文獻回顧將複合災害分為三類，主要包含以時間區分的複合災害 (compound disaster)、以鏈結關係所代表的複合災害與以損害經驗關係產生的複合災害等。首先複合災害的影響，「以災害發生時間點中最早發生衝擊的原生災害直接引發二次災害之影響」(吳杰穎等人，2007; 陳禹銘等人，2009; Cruz and Okada, 2008)。舉例來說，因颱風在一段時間內所帶來豪大雨量而衍生的水災、土石流等災害，皆可歸類為二次災害。其影響由於災害發生成因的複合性，原生災害與二次災害之間區隔不易切割，對採行單一災害管理途徑 (single-hazard management approach) 之災害管理與風險管理系統造成很大壓力，為重要防災課題 (吳杰穎等人，2007)。其次以鏈結關係的複合災害影響，「通常一個主要災害事件的發生，所造成之損失極少侷限為單一災害，往往會直接或間接衍生其他次要的災害，形成一種鏈結關係，其所造成的災害損失不只是加法，而是幾何級數的乘數效果」(許民陽，2007; 許中立、宋佩萱，2011; Funabashi and Kitazawa, 2012)。近年來針對災害鏈結關係議題討論，例如多米諾骨牌效應 (domino effect) 或連鎖故障 (cascading failure) 這種現象稱為在一個系統相互連接零件產生故障，導致觸發連續的故障 (Salzano and Cozzani, 2012)。也有研究將它們定義為「耦合事件」，不良事件觸發一個或多個順序不良事件的產生 (Marzocchi *et al.*, 2009)。其論述均強調在所有連鎖事件內，其中涉及兩個或兩個以上的危險，即兩個或因果聯繫而觸發更多的危害。例如強降雨、土石流、崩塌本身無危害，但卻在持續時間內產生橋樑斷裂與堤防損壞等損害，其代表災害鏈結關係，因共通的威脅誘導觸發災害時間的巧合，導致空間內災損的機率增大 (Greiving *et al.*, 2006)。而在台灣也有研究討論，複合災害影響強調鏈結關係下的對策，如堰塞湖與土石流複合型災害，需緊急辦理多項軟硬體防災措施進行整合之課題，亟待後續研究進一步深化討論 (許中立等人，2008)。另外，以損害經驗關係產生的複合災害，「強調災害特徵和損害之間的複雜性，且比簡單的複合災害所帶來的損傷還要更大，形成巨大的複合災害」(Mimura *et al.*, 2011)。其影響強調損害累積關係，特別是東日本地震所引發海嘯且造成核災事故，儘管日本長時間對於地震與海嘯進行預演，仍造成巨大的破壞，代表複合災害超越過去經驗學習，需重新檢視災害預防的基礎科學，提高可能性危害防治的潛在門

檻。綜合上述複合災害的影響，不全然為各系統之分類，也可統整為該類研究分析途徑的反饋過程，廣義的來說複合災害事件從最初空間與時間範圍內災害現象的探討，可能產生各類災害的鏈結與乘數效果之關係，重新檢驗都市面對複合災害下發展之容受力問題。複合災害影響關係如圖二所示。



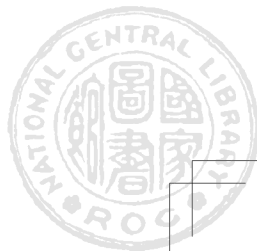
圖二 複合災害影響關係圖

上述藉由複合災害本質的釐清，給予複合災害知識本體論基本語彙與專業知識索引之路徑，其次統整原始模糊且缺乏系統的複合災害影響關係，提供複合災害研究科學論證的衡量條件，以下將以此為基礎，再輔以空間統計與風險機率等定量模式，藉此作為複合災害評估架構設計之基礎論述。

(三) 複合災害量測方法初探

複合災害量測方法目前暫無特定的模式或架構，將複合災害的本質與影響透過系統性與因果性的辯證，嘗試透過不同學科領域知識的整合，進行本文複合災害量測方法初探。在層次上主要包含三點，第一為探索複合災害的時間與空間關係，然而這方面的應用尤其在自然與地理領域有廣泛討論，如有研究以空間分析方法 (spatial data analysis)，主要透過空間自相關分析 (spatial autocorrelation analysis)⁴ 包含全域型空間自相關分析 (global spatial autocorrelation analysis) 與地域型空間自相關分析 (local spatial autocorrelation analysis) 方法，解析自然現象與災害事件討論其空間散布 (spatial dispersion) 與時間間隔 (temporal spacing) 的量測方法 (Sidle and Chigira, 2004; Wing and Tynon, 2008)，此類研究嘗試透過災害空間與時間範圍的探索分析，提供決策者決定哪些區域範圍需要對哪種災害進行回復，給予先驗知識

4. 根據 Anselin (1995) 解釋空間自相關分析主要用於判別事件之空間相依性，其指標分為全域型空間自相關分析與地域型空間自相關分析，兩者均藉由統計顯著性檢定方法，檢定整體與個體空間單元，其空間自相關是否顯著，藉此判斷地區是否具有空間群聚現象。



建立的基礎；第二為解構災害鏈結所衍生的二次災害關係，主要利用「風險」概念為主的量測方式，透過災害事件的敘述統計調查，試算風險機率與災害損失關係的脆弱度衡量方式 (Alcántara-Ayala, 2002；陳禹銘等人，2009；陳亮全、陳海立，2007；陳聯光等人，2008；謝正倫、陳俞旭，2010；李欣輯等人，2010；吳杰穎、黃昱翔，2011；張學聖、廖晉賢，2013)，此類研究藉由多種災害風險評估模式，衡量實際災害發生造成之損失。本文將建立在過去學理推估模型之基礎，配合研究焦點予以修正，作為複合災害災損評估模式建立之基礎。第三為研擬減災與應變過程下的損害關係，並提供未來災害經驗門檻與學習反饋之參考，透過自然災害規模 (natural hazard scales) 的評定方法，如薩菲爾 - 辛普森颶風強度指數 (Saffir-Simpson Scale) 與洪災強度 (magnitude of storm surge) 等方法，強調災害事件的每一指標皆呈現出複雜的測定問題，除了針對所釋放的能量強度進行度量，也需考量災害強度與烈度之災損衝擊 (Feng and Chen, 2009; Feng and Luo, 2010)。有鑑於此，綜合上述複合災害量測方法之初探，本文嘗試透過空間統計解析複合災害的空間現象並建立災害關聯之損失推估經驗公式，其次參考 Feng and Luo (2010) 年的洪災量化強度模型架構，建構台灣未來複合災害評估架構之雛形，做為未來韌性都市下所應具備災防經驗與反饋學習參考。

三、複合災害評估架構設計

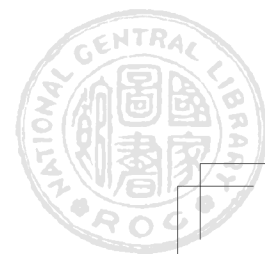
本段包含第一複合災害事件調查，採用「敘述性統計方法」分析複合災害類型、組成、空間分佈與時間間隔之情況；第二複合災害鏈結的關聯式風險分析，採用「災損推估經驗公式」分析複合災害下鏈結與乘數關係；第三複合災害規模分析方法，建立「複合災害烈度值」做為未來複合災害經驗門檻與空間規劃策略之參考。以下論述之。

(一) 複合災害事件分析

本文將藉由國家災害防救科技中心 (2010) 所整理之莫拉克風災相關的數據與圖表，予以組織化與表述，並利用敘述性統計與空間統計方法，配合各種圖表與統計計算，進行空間分佈與時間間隔分析說明。另外結合空間統計分析，運用空間自相關與地域型空間自相關，分析災害的空間分佈特徵，進而討論時間內複合災害空間分佈特性，有助於決定哪些區域範圍面對上述複合災害之衝擊回應的類型而有所不同。

(二) 複合災害鏈結關聯式損失推估分析

本文參考王如意、蘇明道 (2001) 及陳亮全、陳海立 (2007) 等研究，從災後損失調查所建立的水災損失推估之經驗公式，配合本文研究焦點與目的，修改適合本文使用的關係式，以瞭解複合災害損害下鏈結與乘數關係。複合之概念在於評估事件之損害與衝擊所產生的「災害」影響為本文之焦點。由於災損資料多數為縣市的總計資料，部分更細部損害統計資料取



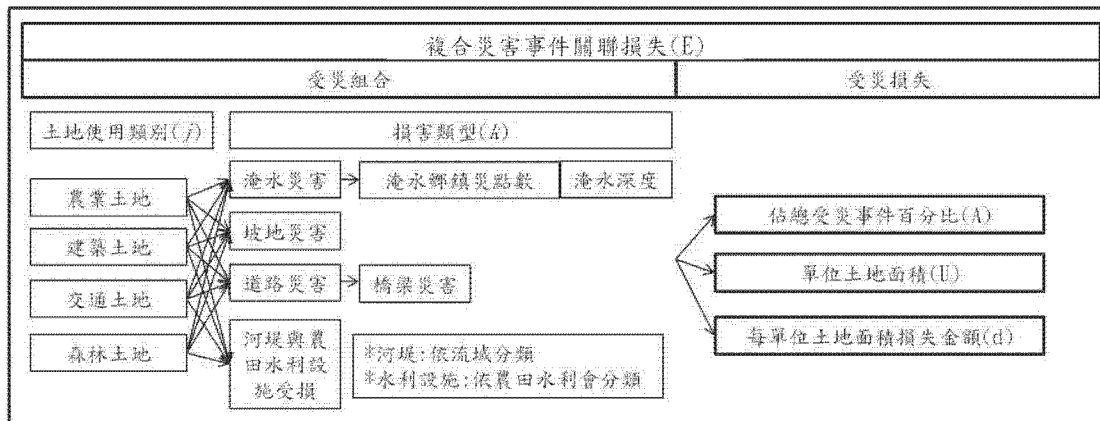
得不易，因此本文以 2010 年國家災害防救科技中心所出版的「莫拉克颱風之災情勘災與分析報告」與行政院農委會「莫拉克颱風農業應變處置實錄損失統計資料」為基礎，推估台南曾文溪流域莫拉克風災之災損作為損失推估之經驗公式分析之依據與架構圖（見圖三），期望做為災害損失前期的風險判斷與規劃作業工作。因此，本文將該關係式修改整理成複合災害鏈結關係損失推估之經驗公式分析，如式所示：

$$E = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 A_{jk} U_{jk} d_{jk} \quad (1)$$

E = 複合災害事件關聯損失， j = 土地使用類別⁵， k = 損害類型⁶， A = 災害事件佔總受災事件百分比， U = 單位土地面積， d = 每單位土地面積的損失金額。

一般而言，複合災害事件關聯損失，與「土地使用類別」、「損害類型」以及「受災損失」三項特性有很大的關係，因此估算損失時需要建立受損面積的土地使用類別 (j)、損害類型 (k)、單位土地面積 (U)、佔總受災事件百分比 (A) 與每單位土地面積損失金額 (d)，組成不同的對應關係。本文利用「映射 (mapping)」的概念，空間單元內各土地類別 (j) 反映災害事件內容易產生災損的土地型態；依序判別各土地使用型態的損害類型求得損害面積；最後每單位土地面積損失金額 (d) 與佔總受災事件百分比 (A) 作為加權複合災害事件下各空間單元受衝擊之程度，做為反映複合災害事件關聯損失。

(三) 複合災害規模分析方法



圖三 複合災害事件關聯損失架構圖

- 根據國土利用調查土地使用分類之定義，分為「建築用地、農業用地、交通用地與森林用地」。
- 根據國家災害防救科技中心所出版的「莫拉克颱風之災情勘災與分析報告」將災害類型分為「淹水災害」、「坡地災害」、「橋樑損壞」與「堤防潰堤」四類災害。

本段包含公式背景、公式原則、模式建立與複合災害規模分類，以下分述如下。

1. 公式背景

本文參考 Feng and Luo (2010)、Feng and Chen (2009)、Feng and Hong (2008) 在過去研究中分別用於計算暴潮 (storm surges)、土石流 (debris flow) 與洪水 (flood) 對於災害強度 (disaster magnitude) 與烈度 (disaster intensity) 之算式，提供本文複合災害量測公式之參考基礎。災害「強度」與「烈度」是兩個不同的概念，強度代表自然的物理現象，強調的是該災害本身之規模、強度，如黎克特制 (Richter Scale) 的地震強度 (earthquake magnitude) 即是與它所釋放的能量有關。而烈度代表該災害影響地區產生災損的規模、嚴重程度 (Furdada *et al.*, 2008)。回顧過去模型之推導過程，其模型討論災害強度等級之劃分，非過去單純區別自然現象所釋放的能量等級 (scale) 判斷，而是建構烈度衡量，強化災害部分複合過程下所造成災損程度 (loss or damage)，與本文複合災害之意涵相同。由於複合災害量測模型目前仍無標準的量測方法，鑑於研究需求本文嘗試以此量化模型架構進行初探與應用。

2. 公式原則

本文公式基本有兩大原則，其一根據災害過去的案例計算出整體性各別之災損經驗參數，進而代表部分災害複合過程之結果。第二本文複合災害之程度值應易於記憶並可提供有關單位進行溝通。大型災害與小型災害之強度與所造成的損失差距甚大，為使計算結果位於 1-10 之區間中，Feng and Luo (2010) 設計之公式採用對數函數，作為複合災害規模之依據。

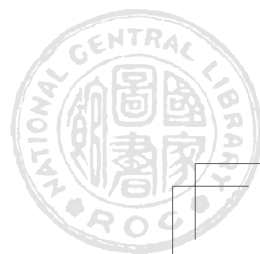
3. 模式建立

本文參考 Feng and Luo (2010)、Feng and Chen (2009)、Feng and Hong (2008) 研究中災害烈度之公式，並將其轉換用以計算複合性災害之烈度，並藉其提供災害管理時之參考依據與進一步之研究分析，研究中計算烈度之公式如下式 (2)(3)：

$$G = a \log(D \times E) + b \quad (2)$$

$$G = a \log(D+1) \times E + b \quad (3)$$

其中， G 代表計算範圍之災害烈度等級， a 、 b 則是依據各災害過去資料所計算出之參數， D 是死亡人數， E 是直接的經濟損失，透過複合災害鏈結關係式風險分析計算式 (1) 求得。本文在颱風災害傷亡估計式 (2) 之參數 a 與 b ，為常數項，主要反映台灣地區歷年遭受颱風損害歷史經驗常數推估，但針對地區性的颱風損害歷史經驗推估常數，台灣過去並無研究之先例。儘管整體性資料的常數推估方法並不妥適，但受限於研究限制，本文初步建議以整體性方法推估過往颱風災害傷亡之歷史數據、計算出相對的推估常數。未來在資料充足的條件下，參數之試算可依照不同之災害或未來災害情況模擬。在參數調整上其公式原本對死亡人數 D 與 E 直接損失兩指標依賴的缺點，當死亡人數等於 0 時會造成整個公式沒有意義。為



解決此情況，再加上考量到台灣災害死亡之情況相對較不嚴重，故將死亡人數以受災人數(死亡、失蹤與受傷加總)做替換，並考量到無受災人數僅有災損時之情形，故轉換後之公式如式(3)。

4. 複合災害規模建立

本文在複合災害規模判定上，參考 Feng and Luo (2010) 的研究，將其先設定烈度區間為 1-10，並給予每個等級一「敘述」，作為以歷史災害經驗做為災難分類依據。如將災害烈度等級八及以上之災害敘述為「災難性的災害」(catastrophic disaster)，等級六到八為「大型災難」(big disaster)，等級四到六為「中型災害」(medium disaster)，小於等級四則為「小災害」(small disaster)。將研究對象(災害)依據烈度分類完後，便可以將過去累積之資料套到設計之公式中，再以迴歸方式，即可得到算式中所缺少之參數。本文參考 Feng and Luo (2010)、Feng and Chen (2009)、Feng and Hong (2008) 之作法，並考量到台灣過去十年內颱風之數量與造成災損之情況，本研究將複合性災害烈度等級比照洪水分為四階，敘述如表一所示。

表一 複合性災害烈度敘述整理表

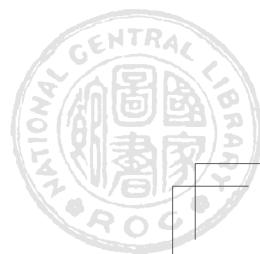
研究對象烈度等級 (G)	複合性災害敘述
$G \geq 8$	災難性災害 (Catastrophic disaster)
$6 \leq G < 8$	大型災害 (Big disaster)
$4 \leq G < 6$	中型災害 (Medium disaster)
$G < 4$	小型災害 (Small disaster)

修改自：Feng and Luo (2010)、Feng and Chen (2009)、Feng and Hong (2008)

本文參考氣象局颱風統計資料整理近十年侵臺颱風之情況，包含歷年颱風名稱、時間、受災人數、災損與災害敘述，如附錄。本文透過公式推導，以所蒐集的十年侵臺颱風之情況各災害過去死亡與災損資料試算出相對比較後的 a 、 b 之參數。最後經由歷史資料帶入求得係數值經由計算可得 $a=1$ ； $b=-5.16$ ，得出台灣複合性災害烈度公式如式(4)

$$G = 1 \log(D+1) \times E - 5.16 \quad (4)$$

以上針對複合災害事件分析複合災害鏈結關聯式損失推估分析與複合災害規模分析方法，作為研究設計基礎方法，以下進行驗證初探。



四、驗證初探

本段內容包含驗證地區概述、複合災害事件分析、複合災害鏈結關係式損失推估分析與複合災害規模分析。

(一) 驗證地區概述

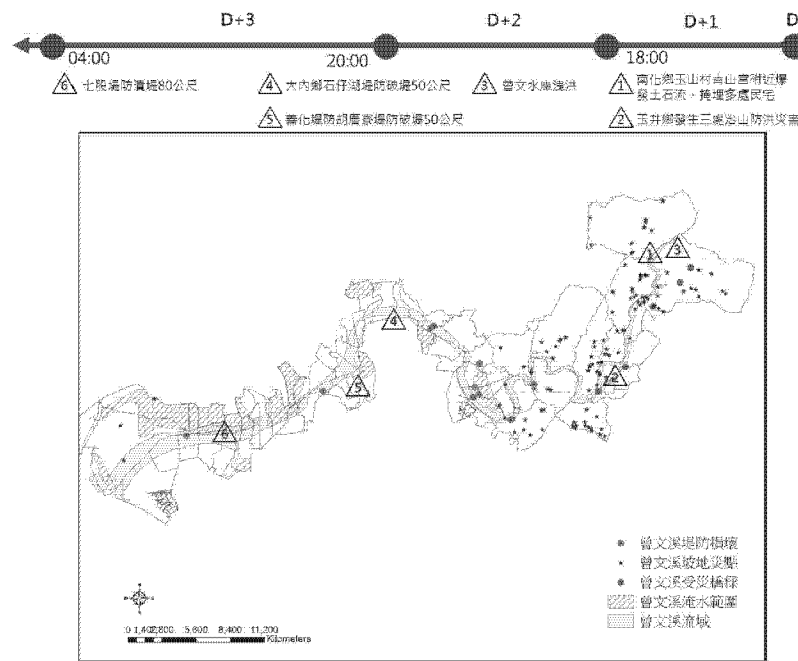
本文以 2009 年之莫拉克颱風為研究對象，將莫拉克颱風造成之災害分為淹水災害、坡地災害、受災橋樑與堤防損壞等四類，而這些災害之主要肇因皆為超大降雨量影響不同土地使用類型所造成之損害，作為本次研究地區的基礎資料。

(二) 複合災害事件分析

利用敘述性統計，進行空間分布與時間間隔分析說明。另外結合空間統計分析，運用空間自相關與地域型空間自相關分析災害的空間分佈特徵，進而討論時間內複合災害空間分佈特性。

1. 曾文溪流域災害事件時序

本文參考國家防救科技中心 (2010) 出版之「莫拉克颱風之災情勘災與分析」報告與相關報章及新聞，整理曾文溪上游災害事件依時序進行討論，初探災害事件發生之關係，如圖四。

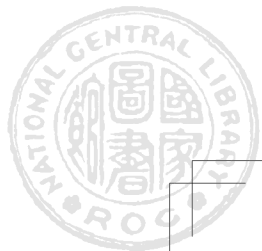


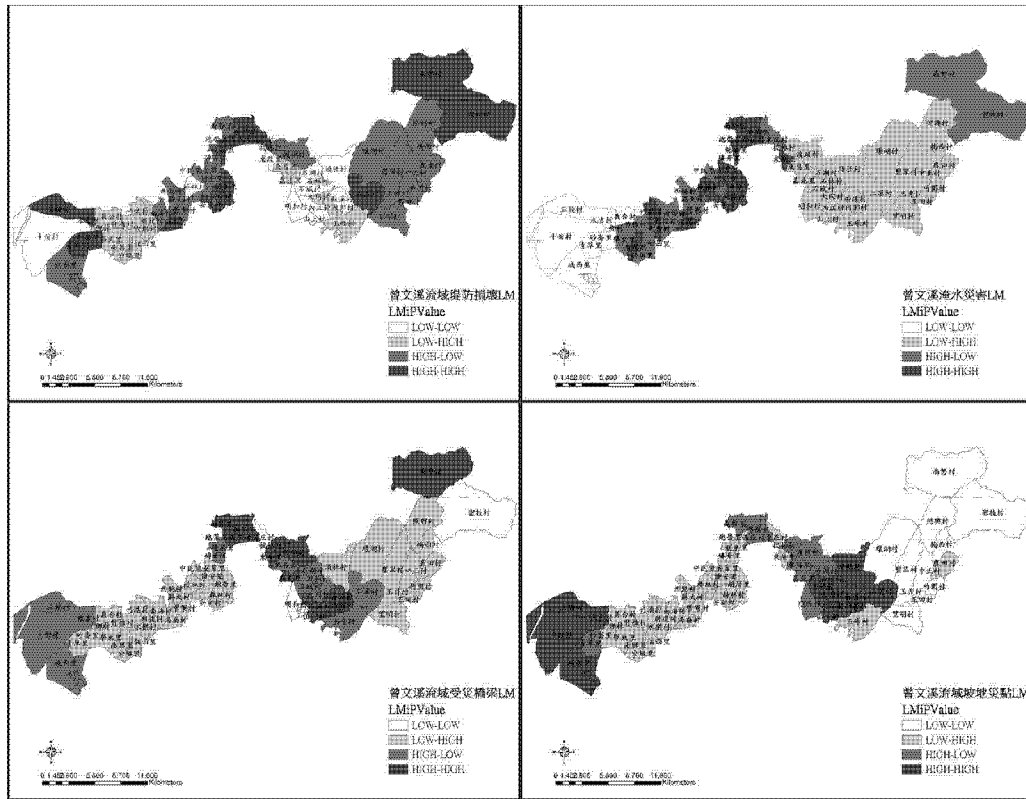
圖四 曾文溪流域災害關聯圖

整理上述曾文河流域之災害發生地點與時序，莫拉克颱風於 8 月 6 日對台灣產生影響設為 d 日，並造成強烈的連續降雨，在 d+1 曾文水庫集水區半日累積雨量已高達 900 毫米；大內鄉石湖村國道三號與曾文溪交界附近河岸潰堤 120 公尺；d+2 的 18 時南化鄉玉山村青山宮附近爆發土石流造成許多民宅淹埋、曾文水庫洩洪；d+3 的 20 時大內鄉、善化鄉堤防破裂造成多處淹水；4 時七股鄉堤防破裂造成淹水。若將上述災害事件時序重新歸結之關聯，曾文河流域之災害統計，受災橋樑 6 處、堤防損壞 8 處、淹水面積 499 公頃、坡地災害 133 處。災害事件發生主要是透過強降雨造成山區土石崩塌阻斷道路與橋樑，其產生新廢棄土方、枯木與土石塊伴隨著土石流沿河道沖瀉而下，而山區水庫在同時也因庫容負荷威脅被迫洩洪，為原本洪患提供更多破壞能量，結合土石衝擊堤防產生破損，使得曾文河流域周邊村里發生淹水損害。其結果可發現，複合災害如此難探究亦為各災害間無法清楚分割之原因，但災害間可能存在時間與空間關聯之特性，故本文進一步針對災害事件如坡地災點、受災橋樑、堤防損壞與淹水災害的空間分布特徵進行探討。

2. 曾文河流域災害事件空間分佈特徵

本文運用地域型空間自相關分析，分別探索坡地災點、受災橋樑、堤防損壞與淹水災害的空間分布特徵，當值呈現High-High此現象表示高屬性相似值之地區在空間中有聚集現象，而呈現 Low-Low 且低屬性相似值之地區在空間中亦有聚集的現象，反之若出現 High-Low 或 Low-High 時，代表空間中各分區之屬性相似值和其他地區空間相關位置無特定關聯性，如圖五所示。本文透過曾文河流域災害空間特徵分析，首先針對曾文河流域基本環境特性與土地使用概況進行描述，曾文河流域上游水庫長期淤積嚴重造成調蓄能力降低，且河川集水區周遭群聚開墾，多屬超限利用、過度開發之未管制行為，本文從 1996 年與 2006 年國土利用調查之土地利用分類，比較 1996 與 2006 年兩個不同時期之土地利用現況的空間變遷顯示，建築用地 (1.16%)、遊憩用地 (0.12%) 面積比例增加，而農業用地 (-28.6%)、水利用地 (-8.03%) 面積比例則減少，的確存在不當使用之情形，容易造成不當開發地區產生相關災害複合之影響。本文進一步針對莫拉克風災所造成各類災害的複合影響，包含受災橋樑、崩地災害、淹水災害與堤防損壞進行分析，結果發現的確存在不同的空間群聚特徵，如坡地災害空間群聚特徵上，以中游石城村、內江村、二溪村、頭社村，大部分崩塌地區鄰近道路與河流，由於上游水庫洩洪強烈侵蝕道路與河道，造成樹木與土石崩落；在受災橋樑空間群聚特徵上，以中游曲溪村、內郭村、內江村西庄村與寮廓村，該區域受災橋樑多主要作為連結村落往來聯外道路及使用，遭受崩塌土石與樹木將河道中蛇籠被沖毀與河道淤積間接造成橋樑損壞；在淹水災害與堤防損壞空間群聚特徵上，中下游以寮廓里、南勢里 安業里 胡厝里與上游密枝村與南勢村、中游以東庄村、胡厝與廓寮村、下游以三股村、沙崙里與青草里，上述兩者主要河道兩旁的不當開發導致河道周邊土地土壤流失使河道沖蝕造成洪水溢堤與潰堤。其綜合結果可發現，各類型災害均有明顯的地域性群聚特徵，可作為後續分析災害關聯損失推估之基礎。





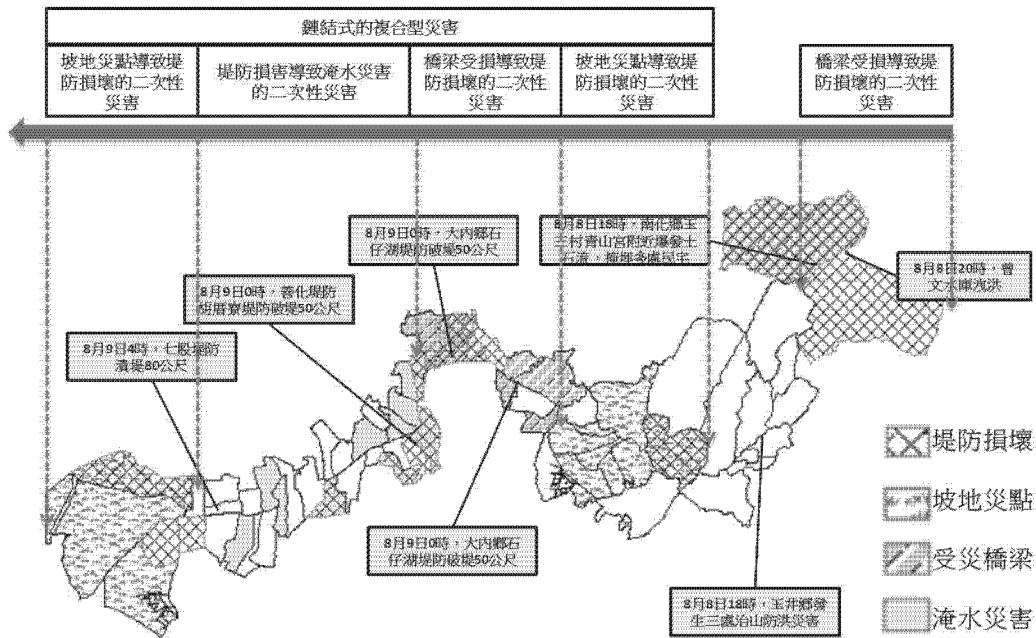
圖五 曾文河流域災害空間特徵圖

(三) 複合災害關聯式損失推估分析

本段以曾文河流域複合災害關聯、曾文河流域複合災害空間尺度特徵推估與曾文河流域複合災害關聯式災損推估，分述如下：

1. 曾文河流域複合災害關聯

本文運用次數統計針對具有災害空間群聚地區，探索曾文河流域複合災害關聯情況。由於複合性災害以災害發生時間點中最早發生衝擊的原生災害稱直接引發二次災害之影響，並因災害鏈結關係造成災害損失不只是加法，而是幾何級數的乘數效果。有鑑於此，本文透過莫拉克風災所引發各災害複合影響的空間關聯群聚特徵，嘗試對災害鏈結關聯進行空間影響的討論，最後做為評估複合災害鏈結關聯式損失推估分析的基礎，詳如圖六所示。



圖六 曾文河流域複合災害關聯圖

經結果發現，複合災害鏈結關係，有如多米諾骨牌效應 (domino effect) 導致一連串的事件或相鄰聯繫在一起的行動及其效果。本文將其災害關聯的型態，依據空間與時間順序關係可分為三類，第一類為上游中游因莫拉克極端降雨與水庫洩洪的威脅，驅使山洪暴發造成橋樑受損，其剝落的土方石塊，間接導致堤防損壞，為破壞型的複合災害關聯；第二類為因降雨促使土石鬆動於陡坡處產生坡地災害，其土砂造成河道淤積促使洪水宣洩不易，導致堤防受損為累積型的複合災害關聯；第三類為上述兩類現象的起因造成堤防損壞，潰堤造成建築用地、農業用地的淹水損害為綜合型的災害關聯。三類的災害關聯，促使二次災害的發生，代表災害鏈結關係因共通的威脅誘導觸發災害時間的巧合，導致空間內災損的機率增大，更形成鏈結型的複合災害造成嚴重災損。雖然就災害科學研究而言，解析災害鏈結關係在於難掌握不同系統內的風險特性與系統間的互動關係，特別是欲掌握所有系統的互動特性與環境風險形成機制，雖在實際運用上仍有其問題與限制存在，但本文提供對於複合災害知識譜系的建立，希冀可提供未來更多相關複合災害研究的論證，後續將針對複合災害空間尺度特徵推估進行進一步分析。

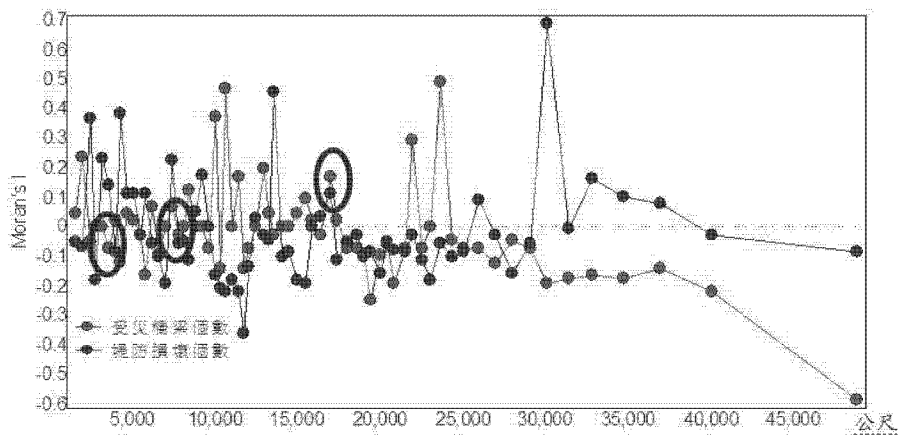
2. 曾文河流域複合災害空間尺度特徵推估

本文針對破壞型、累積型與綜合型等三類鏈結式的複合災害空間關聯，透過雙變數空間自相關分析，及不同尺度敏感性分析，探索莫拉克風災各類災損在何種空間尺度下的空間關聯現象較為顯著。首先將複合災害時間序列從曾文溪上游南勢村至下游十份村進行排列，並

建立各類複合災害所處空間單元地理座標；其次建置列的尺度等距 (distance classes) 主要透過固定的延滯間距 (lag spacing)，當延滯間距指定為 5000 公尺，其尺度將以 0、5000 公尺、10000 公尺、15000 公尺等為倍數基準，最後運用空間相關統計方法如空間自相關 (Moran's I)，找出空間顯著之地區，並透過尺度等距圖找出各類複合災害點間空間相關性與空間尺度特徵，詳述如下。

2.1 破壞型鏈結式複合災害空間尺度敏感性分析

本文在破壞型複合災害主要考量從上游至下游順序受災橋樑個數與堤防損壞個數間的空間尺度敏感性分析，參考如圖七。

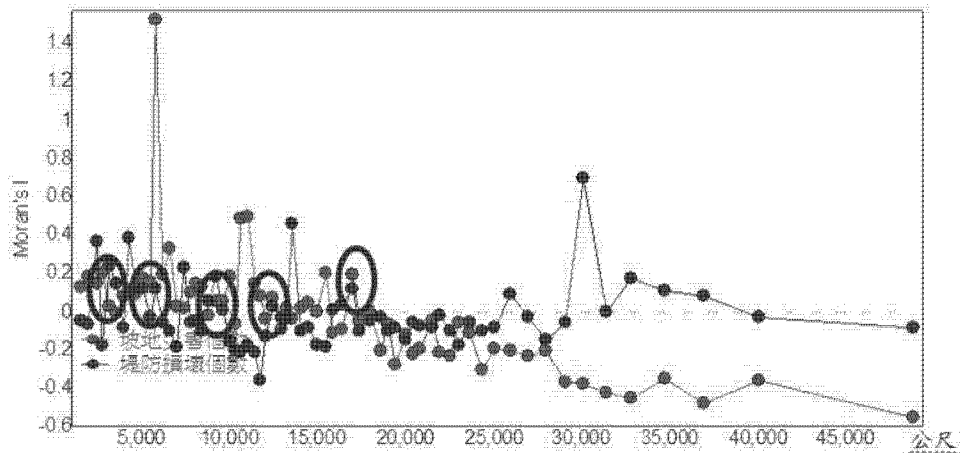


圖七 曾文溪流域破壞型災害關聯空間尺度敏感性分析

經結果發現，破壞型災害關聯空間尺度特徵，由於上游中游因莫拉克極端降雨與水庫洩洪的威脅，驅使受災橋樑與堤防損壞產生破壞型災害的空間影響。整體 Moran's I 值為 0.134，達統計上之顯著性 ($P < 0.05$) 具有輕度聚集空間自相關性，空間尺度在 4.6 公里值閾時，變數之間存在明顯空間依賴性受災橋樑與堤防損壞產生空間關聯現象，再者空間尺度達 7.4 公里時複合災害為顯著的空間關聯現象，最後破壞型災害為 16.8 公里時仍有顯著之表現。雖然本文之結果只能強化描述受災橋樑與堤防損壞在空間互動之過程，其意涵代表透過空間尺度的指標探索兩者外在物理條件壓力累積的空間擴散情形。因此，未來可進一步針對如何回應破壞型災害關聯的具體防範措施進行檢討。

2.2 累積型鏈結式複合災害空間尺度敏感性分析

本文在累積型複合災害主要考量從上游至下游順序坡地災害個數與堤防損壞個數間的空間尺度敏感性分析，參考如圖八。

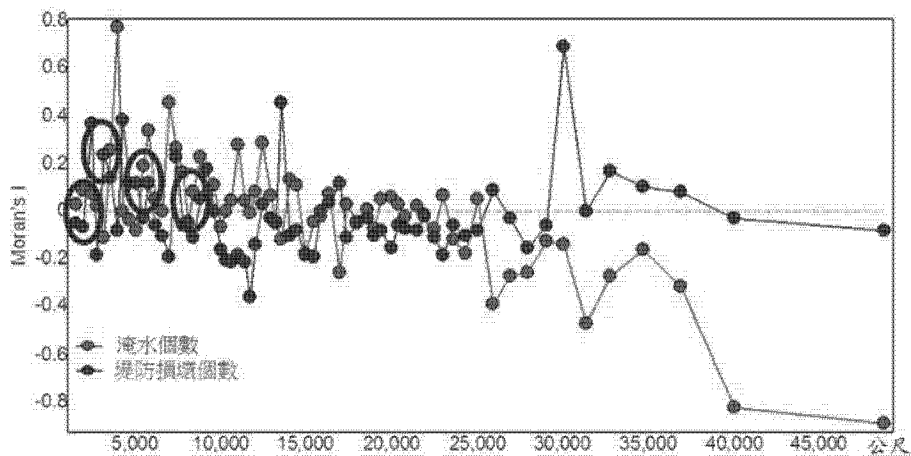


圖八 曾文溪流域累積型災害關聯空間尺度敏感性分析

經結果發現，累積型災害關聯空間現象，由於上游中游因降雨促使土石鬆動於陡坡處產生坡地災害，驅使河道淤積導致坡地災害與堤防損壞產生累積型災害的空間關聯現象。整體 Moran's I 值為 0.065，達統計上之顯著性 ($P < 0.05$)，尤其在空間尺度在 2.5 公里、3.2 公里與 4.6 公里值闕時，坡地災害與堤防損壞村里產生密集且波段小的空間關聯影響，再者空間尺度達 7.47 公里、9.26 公里時累積型災害的空間關聯現象較為顯著。本文之結果藉此討論坡地災害與堤防損壞之空間互動過程，其意含代表坡地砂土之淤積問題是歷年累積下之結果，其沙土推移速度緩慢，也致使空間尺度產生許多密集波動的區間尺度。因此未來可進一步針對如何回應累積型災害關聯的土砂清淤區位問題進行檢討。

2.3 綜合型鏈結式複合災害空間尺度敏感性分析

本文在綜合型複合災害主要考量從上游至下游順序淹水點位與堤防損壞個數間的空間尺度敏感性分析，參考如圖九。



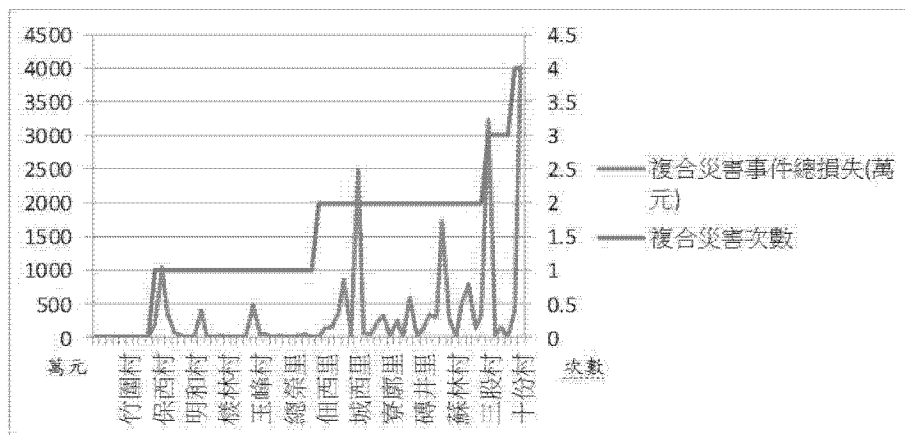
圖九 曾文溪流域綜合型災害關聯空間尺度敏感性分析

綜合型災害關聯空間尺度敏感性分析，為破壞型與累積型災害關聯現象的起因造成堤防損壞，潰堤造成建築用地、農業用地的淹水損害為綜合型的災害關聯。經結果發現，整體 Moran's I 值為 0.059，達統計上之顯著性 ($P < 0.05$)，尤其在空間尺度在 2.5 公里、3.5 公里值關時，坡地災害與堤防損壞產生密集且波段小的空間關聯影響，再者空間尺度達 5.8 公里時複合災害空間關聯現象較為顯著，最後綜合型為 8.8 公里時災害空間關聯現象有顯著之表現。

本文之結果發現災害的空間尺度本身即是非常複雜且隨機之過程，但在某種意義上，複合災害之衝擊透過空間尺度敏感性分析，藉此表明當地區面對該類災害時，所接受暴露與脆弱之可能，有助於決定哪些區域範圍面對上述複合災害之衝擊回應的類型而有所不同。然而本文建議未來應持續長時間記錄複合災害影響的空間路徑與範圍，進而解析複合災害內部組成與檢驗社會回應的方式，透過經驗學習與反饋給予未來土地使用規劃有更合理面對調適與適應災害之能力。

3. 曾文河流域複合災害鏈結關聯式災損推估

本文參考王如意、蘇明道 (2001) 與陳亮全、陳海立 (2007) 等研究修改適合本文使用的災後損失推估之經驗公式，以瞭解複合災害損害下鏈結與乘數關係。在複合災害次數統計上，透過各里災害發生的總計次數，作為複合災害發生次數的基準值，其次透過災後損失推估之經驗公式進行災損推估，試算出台南曾文河流域莫拉克風災之複合災害次數與複合災害事件總損失關聯，如圖十，期望做為災害損失前期的風險判斷與規劃作業工作。



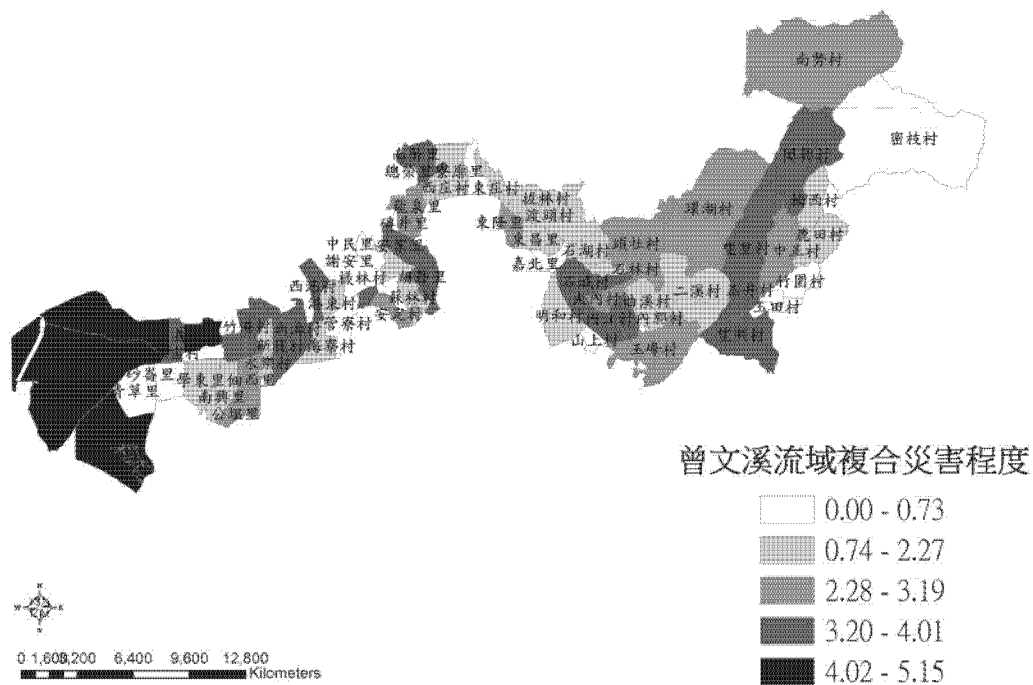
圖十 複合災害次數與複合災害事件總損失關聯圖

其結果發現，複合災害鏈結關聯損失進行次數總計的比較，X 軸代表各村里，Y 軸代表複合災害鏈結關聯損失值與各村里各災害事件的總計次數。複合災害次數與複合災害事件總損失具有高度關係，當複合災害次數越多相對造成複合災害的總災損也越多。在複合災害損失方面，複合災害次數與災損呈現正相關。在空間分布上，複合災害災損從上、中、下游對於複合災害影響的次數也逐漸增強。例如曾文河流域下游末段的十份村與三股村遭受淹水、

受災橋樑、潰堤與坡地災害等三種以上類型災害複合的衝擊，造成三億以上的複合災害災損為最高，可能代表複合災害有明顯的鏈結與乘數關係。儘管本文受限於資料以次數統計推估方法解釋災害次數與災損之總計關係過於簡略，未來待後續相關研究修改適合之關係式，使災損推估值更加精確。整體來說，複合災害關聯式損失推估除了提供未來土地使用規劃與防救災決策支援工具之參考外，也嘗試對於解析複合災害演化與初探性的認識，為未來相關研究工作者持續關注的課題。

(四) 複合災害規模分析

本文複合災害規模分析主要參考 Feng and Luo (2010) 年所提出之災害量化公式為基礎，如圖十一所示：



圖十一 曾文河流域複合災害程度值

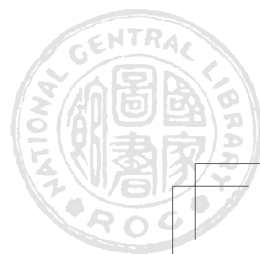
經結果發現，依據曾文河流域複合災害烈度值敘述表分為兩類，主要為 $G < 4$ 的小型災害與 $4 \leq G < 6$ 的中型災害。當顏色越深代表複合災害烈度越強烈，反之越淺代表複合災害烈度影響越弱。複合災害最嚴重村里包含三股村、十分村、義合村與保西村等四個村里，主要集中於下游海岸地區；其次為中游南海村、照興村、南勢里與安業里等14個村里，主要集中於中下游地區；無顯著複合災害影響之地區為嘉北里、西庄村與竹圍村等，而這類村里除了代表承受或化解該次複合災害之衝擊，也有可能因本身自然與都市發展條件提供耐災之能力。而災害之衝擊對應本文所建立之相對複合災害程度屬於 $4 \leq G < 6$ 的中型災害，雖無法明顯判斷該

區域災害之系統門檻，但卻可以做為未來災防政策的指引，提供規劃介入的時間策略，建議進一步針對該區域進行災害容受力分析與合理的門檻條件。總體而論，由於複合災害之發生存在時間與空間上的獨特性，像是中上游地區由於橋樑損壞多座落山坡地，主要連結林道、村落往來連外道路使用，多數災害情形受到沖刷造成橋樑流失坡地大規模崩塌，造成各系統間彼此鏈結著所衍生二次災害的發生，並以乘數效果擴及其規模與力度，導致下游因河道淤積造成淹水的複合災害。本研究嘗試利用探索式的分析方法，嘗試提供政府未來在執行減災與應變之參考，後續對於都市發展之容受力進行評估並反饋學習做為下次複合災害來臨之借鏡。

五、結論與建議

複合性災害評估架構，未來除了導入耐災都市的空間規劃基本概念，且運用更具系統性的觀念與方法整合過去地理、水利工程、防災管理等研究基礎，進而釐清空間規劃面對跨領域研究之各種迷思，以減緩複合災害防治面對都市規劃上產生規劃失效 (planning failure) 之課題。最後複合性災害評估架構，提供未來流域規劃不僅僅是消極的災害預防，更應是積極的透過對災害特性與土地使用交互影響的掌握，以調整未來土地使用組合之方式，進而協助決策者規劃應變策略。本文之結論論述如下：

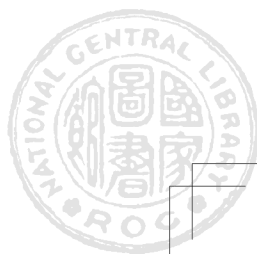
1. 本文研究設計藉由過往文獻界定複合災害之意涵，嘗試針對曾文溪流域的複合災害事件時序與空間群聚現象進行討論，經結果發現，災害發生會不斷經歷不同自然環境條件與土地使用情況，逐漸增強複合災害的規模與強度。然台灣目前災害防治多以單一災害進行管制，本文之結果供有關單位面對未來複合型災害管理之參考。
2. 本文在災害關聯型態分析上，包含破壞型災、累積型與綜合型災害關聯三種，嘗試利用雙變數空間自相關分析，透過不同尺度敏感性分析，探索莫拉克風災各類災害在何種空間尺度下的空間關聯現象較為顯著。藉此表明當地區區面對該類災害時，所接受暴露與脆弱之可能，有助於決定哪些區域範圍面對上述複合災害之衝擊回應的類型而有所不同。
3. 本文在複合災害關聯損失推估分析上，複合災害次數與複合災害事件總損失呈高度關聯，且災損衡量卻能代表部分在一定時間與空間範圍內，災害複合關係下的結果。由於複合災害牽涉複雜的動態過程，本文受限於災損相關階層與因果關係等相關基礎資料並無法釐清災害複合關係。
4. 本文在複合災害規模分析，依據曾文溪流域複合災害烈度值包含 $G < 4$ 的小型災害與 $4 \leq G < 6$ 的中型災害。自然與都市發展條件提供耐災之能力，災害之衝擊雖無法明顯判斷該區域災害之系統門檻，但卻可以做為未來災防政策規劃介入時間策略的指引，未來建議進一步針對該區域進行災害容受力分析，已建立更合理的門檻條件。



5. 本文受限於複合災害的時間、空間等案例資料仍在累積，尤其在複合災害發生之機率、影響範圍、致災前後關聯與階層因果關係等討論，需要更多資料進行佐證，故為本文研究之限制及供後續研究方向之參考。

六、參考文獻

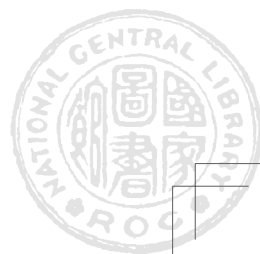
1. 王如意、蘇明道 (2001)，「台北盆地及鹽水河流域示範區颱風災害危險度分析 (二)」，台北：經濟部水資源局。
2. 王金山、鍾明劍、冀樹勇 (2011)，降雨誘發崩場地滑動之監測回饋分析與預警應用探討，「中興工程」，110 期，第 27-40 頁。
3. 行政院國家科學委員會 (2011)，「台灣氣候變遷科學研究報告」，台北：科技部。
4. 吳杰穎、邵珮君、林文苑、柯于璋、洪鴻智、陳天健、陳亮全、黃智彥、詹士樑、薩支平 (2007)，災害管理學辭典 - 二次災害，台北：五南。
5. 吳杰穎、黃昱翔 (2011)，颱風災害脆弱度評估指標之建立：以南投縣水里鄉為例，「都市與計劃」，第 38 卷，第 2 期，第 195-218 頁。DOI: 10.6128/CP.38.2.195.
6. 李欣輯、楊惠萱、廖楷民、蕭代基 (2010)，水災社會脆弱性指標之建立，「建築學報」，第 10 卷，第 3 期，第 163-182 頁。DOI: 10.6128/CP.38.2.195.
7. 洪鴻智、陳玲怡 (2007)，洪災風險評估與災害風險稅課徵一以台北市為例，「臺灣土地研究」，第 10 卷，第 2 期，第 95-125 頁。
8. 國家災害防救科技中心 (2010)，「莫拉克颱風之災情勘災與分析」，新北市：國家災害防救科技中心。
9. 許中立、林潤榮、陳淑慈、戴欣怡 (2008)，龍泉溪堰塞湖下游危險聚落複合災害應變對策之探討，「坡地防災學報」，第 7 卷，第 1 期，第 70-85 頁。
10. 張學聖、廖晉賢 (2013)，台南市土地使用計畫之水災風險分析，「都市與計劃」，第 40 卷，第 1 期，第 59-79 頁。DOI: 10.6128/CP.40.1.59.
11. 許中立、宋佩萱 (2011)，莫拉克颱風後屏東縣原住民鄉之易致災性分析，「坡地防災學報」，第 10 卷，第 1 期，第 1-9 頁。
12. 許民陽 (2007)，複合型災害，「台灣大百科全書網站」，<http://taiwanpedia.culture.tw/web/content?ID=100593>，(2013 年 9 月 24 日)
13. 陳亮全、陳海立 (2007)，易致災都市空間發展之探討：以台北盆地都市水災形成為例，「都市與計劃」，第 34 卷，第 3 期，第 293-315 頁。DOI:10.6128/CP.34.3.293.
14. 陳禹銘、許秋玲、樊國恕 (2009)，我國複合災害風險系統架構之探討，「危機管理學刊」，第 6 卷，第 2 期，第 1-12 頁。
15. 陳聯光、陳樹群、周憲德、王文龍、林銘郎 (2008)，汶川地震坡地災害勘查與集集地震比



- 較探討，「中華水土保持學報」，第 39 卷，第 4 期，第 403-421 頁。
16. 傅金城、張駿暉、葉森海、黃成甲、謝龍生、游保杉 (2010)，淹水災害預警技術，「國研科技」，第 25 期，第 15-27 頁。
 17. 曾國源、張斐章 (2006)，以共用臨域類神經網路架構土石流預警系統之研究，「中華水土保持學報」，第 37 卷，第 3 期，第 259-270 頁。
 18. 詹士樑、黃書禮、王思樺 (2003)，臺北地區洪水災害風險分區劃設之研究，「都市與計劃」，第 30 卷，第 4 期，第 263-280 頁。DOI: 10.6128/CP.30.4.263.
 19. 謝正倫、陳俞旭 (2010)，二次災害傳遞過程與災區重建之新構想，「中華防災學刊」，第 2 卷，第 2 期，第 109-116 頁。
 20. Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association: LISA, *Geographical Analysis*, 27(2): 93-115. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x.
 21. Alcantara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries, *Geomorphology*, 47(2-4): 107-124. DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00083-1.
 22. Brand, F. S. and Jax, K. (2007). Focusing the meaning(s) of resilience: Resilience as a descriptive concept and a boundary object, *Ecology and Society*, 12(1): 23-39.
 23. Chen, N. and Graham, P. (2011). Climate change as a survival strategy: soft infrastructure for urban resilience and adaptive capacity in australia's coastal zones, In: *Resilient Cities: Cities and Adaptation to Climate Change - Proceedings of the Global Forum*, Otto-Zimmermann, K. (ed.), New York: Spnigor, 379-388. DOI: 10.1007/978-94-007-0785-6_38.
 24. Christopherson, S., Michie, J., and Tyler, P. (2010). Regional resilience: Theoretical and empirical perspectives, *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 3(1): 3-10. DOI: 10.1093/cjres/rsq004.
 25. Cruz, A. M. and Okada, N. (2008). Consideration of natural hazards in the design and risk management of industrial facilities, *Natural Hazards*, 44(2): 213-227. DOI: 10.1007/s11069-007-9118-1.
 26. Davoudi, S., Shaw, K., Haider, L., Quinlan, A. E., Peterson, G. D., Wilkinson, C., and Porter, L. (2012). Resilience: A bridging concept or a dead end? "Reframing" resilience: Challenges for planning theory and practice interacting traps: Resilience assessment of a pasture management system in Northern Afghanistan urban resilience: What does it mean in planning practice? Resilience as a useful concept for climate change adaptation? The politics of resilience for planning: A cautionary note, *Planning Theory & Practice*, 13(2): 299-333. DOI: 10.1080/14649357.2012.677124.
 27. Feng, L. and Luo, G. (2010). Proposal for a quantitative index of flood disasters, *Disasters*, 34(3): 695-704. DOI: 10.1111/j.1467-7717.2010.01165.x.



28. Feng, L. H. and Chen, X. (2009). Practical research on quantitative calculation of debris flow magnitude and disaster intensity, *Environmental Geology*, 57(4): 863-871. DOI: 10.1007/s00254-008-1365-2.
29. Feng, L. H. and Hong, W. (2008). A quantitative expression for the magnitude and intensity of disaster of storm surges, *Natural Hazards*, 45(1): 11-18. DOI: 10.1007/s11069-007-9149-7.
30. Funabashi, Y. and Kitazawa, K. (2012). Fukushima in review: A complex disaster, a disastrous response, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 68(2): 9-21. DOI: 10.1177/0096340212440359.
31. Furdada, G., Calderón, L., and Marqués, M. (2008). Flood hazard map of La Trinidad (NW Nicaragua): Method and results, *Natural Hazards*, 45(2): 183-195. DOI: 10.1007/s11069-007-9156-8.
32. Greenhalgh, S. A. and Parham, R. T. (1986). The richter earthquake magnitude scale in south-australia, *Australian Journal of Earth Sciences*, 33(4): 519-528. DOI: 10.1080/08120098608729388.
33. Greiving, S., Tarvainen, T., and Jarva, J. (2006). Spatial pattern of hazards and hazard interactions in Europe, In: *Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions*, Schmidt-Thomé, P. (ed.), Espoo: Geological Survey of Finland, 83 - 92.
34. Ian, B., Robert W. K., and Gilbert, F. W. (1993). *The Environment as Hazard*, New York: Oxford University Press.
35. Marzocchi, W., Mastellone, M. L., and Di Ruocco, A. (2009). *Principles of Multi-risk Assessment: Interactions Amongst Natural and Man-induced Risks*, Bruscel: European Commission.
36. Mimura, N., Yasuhara, K., Kawagoe, S., Yokoki, H., and Kazama, S. (2011). Damage from the Great East Japan Earthquake and Tsunami - A quick report, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(7): 803-818.
37. Salzano, E. and Cozzani, V. (2012). Introducing external hazard factors in quantitative risk analysis, *Revista De Ingeniería*, (37): 50-65.
38. Sidle, R. C. and Chigira, M. (2004). Landslides and debris flows strike Kyushu, Japan, *Eos Transactions, AGU*, 85(15): 145-151. DOI: 10.1029/2004EO150001.
39. Wing, M. G. and Tynon, J. F. (2008). Revisiting the spatial analysis of crime in National Forests, *Journal of Forestry*, 106(2): 91-99.



附錄

附表一 台灣近十年颱風受災情形與災害敘述表

颱風	時間(西元年月)	受災人數	災損(元)	災害敘述
莫拉克	200908	763	164,700,000,000	災難性災害
納莉	200109	369	5,680,602,000	災難性災害
桃芝	200107	214	14,693,705,000	災難性災害
奇比	200106	146	783,281,000	災難性災害
敏督利	200406-07	45	6,516,458,000	大型災害
艾利	200408	29	4,787,900,000	大型災害
卡玫基	200807	26	3,381,220,000	大型災害
辛樂克	200809	21	5,643,770,000	大型災害
海棠	200507	15	9,831,405,000	大型災害
尤特	200107	7	191,509,000	中型災害
海馬	200409	6	232,424,000	中型災害
納坦	200410	5	536,159,000	中型災害
潭美	200107	5	126,905,000	中型災害
薔密	200809	4	7,547,679,000	中型災害
蘭瑪都	200412	4	556,794,000	中型災害
米勒	200311	4	212,494,000	中型災害
泰利	200508	3	3,670,653,000	中型災害
杜鵑	200308	3	2,633,875,000	中型災害
碧利絲	200607	3	786,873,000	中型災害
納克莉	200207	3	3,870,000	中型災害
鳳凰	200807	2	2,918,475,000	中型災害
龍王	200509	2	2,153,988,000	中型災害
芭瑪	200910	1	62,642,000	中型災害
韋帕	200709	1	43,994,000	中型災害
利奇馬	200109	0	857,353,000	小型災害
瑪莎	200508	0	586,869,000	小型災害
西馬隆	200105	0	70,611,000	小型災害
哈格比	200809	0	16,105,000	小型災害
寶發	200608	0	5,450,000	小型災害

