



國立臺灣大學工學院土木工程學研究所

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

天然氣網絡震災韌性分析—以臺南市新化區為例

Seismic Risk and Resilience Analysis of Natural Gas

Networks - Case Study of Xinhua District, Tainan

聶禎佑

Chen-Yu Nieh

指導教授：林偲妘 博士

Advisor: Szu-Yun Lin, Ph.D.

中華民國 112 年 6 月

June, 2023

誌謝



在完成本篇碩士論文的過程中，我要感謝所有支持和幫助過我的人們，不管是在研究上還是在日常生活中。首先，我要感謝我的指導教授林偲妘老師，給予了我寶貴的建議與指導。在做研究時，提供了豐富的專業知識和經驗，讓我得到更多的啟發，也感謝口試委員蘇文瑞與林其穎教授在修訂論文時仔細審閱我的論文並提供寶貴的建議，讓此論文得以順利完成。另外，我想特別感謝營管組的同學們，一起待在研究室的日常時光總是十分有趣，也在修習課程與討論研究時讓我受益良多。最後，感謝我的家人和朋友，在生活上及研究上的幫助，讓我可以沒有負擔，成功地完成我的學業。

感謝各位無私的幫助和支持！

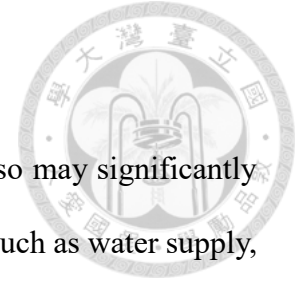
摘要



現今社會中，地震災害不僅損害建築物，對於重大基礎建設的衝擊如自來水、污水、電力、瓦斯與其他維生管線等也大大影響災後的民生生活水準，本研究欲針對維生管線中的天然氣管線，分析中低壓管線受到地震災害破壞之風險，並考慮搶修管線時開關閥關閉將擴大影響範圍。地震災害除了造成天然氣網絡系統本身的影響外，洩漏的氣體還造成了震後火災惡化的潛在風險；另一方面，受損管線的修復可能會影響地震災害時的緊急避難交通，這些相依性因素都應在修復過程中加以考慮。本研究藉由臺灣地震損失評估系統(TELES)預估地震參數與天然氣網絡系統之 GIS 圖資進行疊圖分析。採用管線災損率(Repair Rate, *R.R.*)之方式評估管線耐震能力，以蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)天然氣管線破壞，並透過受影響用戶需求端數量來衡量整體網絡之供氣能力。本研究以臺南市新化區與中洲構造斷層規模 6.9 想定地震為分析案例，參考國內外文獻提出的管線震災模擬分析方法，考量災害當下應變時開關閥關閉擴大影響範圍之情況、評估惡化震後火災的風險以及緊急避難交通之影響，提出綜合的天然氣網絡震災韌性分析框架，決策者可以根據模擬結果作出適當的應對策略。

關鍵字：韌性，天然氣網絡，瓦斯管線系統，震災風險評估，相依性

ABSTRACT



Earthquake disasters not only deal damage to buildings, but also may significantly affect people's lives owing to the impacts on critical infrastructures such as water supply, wastewater, electricity, gas, and other lifeline systems. This study will focus on the natural gas network, analyzing the risk of failure in the mid/low-pressure pipelines from the earthquake scenario. During the assessment, it is also considered that the closure of valves as the emergency response could enlarge the affected range. In this study, repair rate, R.R. is applied to evaluate the failure of natural gas pipelines. The simulation of the natural gas network is conducted with Monte Carlo method. In addition to the impacts within the natural gas system itself, the leaking gas may also cause a potential risk of worsening post-earthquake fire. On the other hand, the repair of damaged pipelines may affect the traffic. These cascading effects should be considered during the restoration process. This study refers to the domestic and foreign literature on the method proposed for the simulation analysis of pipeline subject to earthquake disasters, considering the closure of valves, the risk of worsening post-earthquake fire and the influence on traffic. This study provides an analytical framework to access the earthquake hazard risk of natural gas pipelines from the perspective of system functionality and community resilience. The proposed method is demonstrated on the natural gas system in Xinhua District, Tainan, subject to a 6.9 magnitude earthquake scenario. Decision makers can refer to the simulation results when planning related emergency responses and disaster mitigation strategies.

Keywords: Resilience, Natural gas network, Monte Carlo simulation, Seismic risk assessment, Interdependency.

CONTENTS



誌謝	i
摘要	ii
ABSTRACT	iii
CONTENTS	iv
LIST OF FIGURES	viii
LIST OF TABLES	x
Chapter 1 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的與架構	2
Chapter 2 文獻回顧	3
2.1 引言	3
2.2 韌性與脆弱度及韌性考量因子	3
2.2.1 韌性定義	3
2.2.2 韌性與脆弱度比較	5
2.2.3 韌性函數/曲線	5
2.2.4 相依性與韌性考量因子	5
2.3 天然氣管線系統	6
2.3.1 重大基礎建設與維生管線	6
2.3.2 天然氣背景	6
2.3.3 天然氣供應架構與災害分析	8

2.4	管線震損模擬	10
2.4.1	地震災害模擬	10
2.4.2	管線災損率	10
2.4.3	管線復原修復	11
2.5	天然氣系統相依性	11
2.5.1	相依性分類與關係	12
2.5.2	天然氣相依性類別	13
2.6	小結	14
Chapter 3	研究方法	15
3.1	引言	15
3.2	整體系統社區韌性架構	15
3.3	研究流程	16
3.4	研究假設前提	17
3.5	管線破壞模擬方法	18
3.5.1	地震情境與參數	18
3.5.2	管線災損率公式	19
3.5.3	管線破壞機率	20
3.5.4	管線修復成本	22
3.6	天然氣系統供氣能力評估	23
3.6.1	上下游對應關係	23
3.6.2	供氣能力指標	25
3.7	天然氣網絡相依性—緊急避難之交通需求影響	25

3.8	天然氣網絡相依性—惡化震後火災	26
3.8.1	惡化震後火災風險	26
3.8.2	惡化震後火災脆弱度指標	26
3.9	復原策略與回復指標	27
3.9.1	特定策略復原	27
3.9.2	綜合韌性量化指標	28
3.10	研究方法小結	28
Chapter 4	案例分析	30
4.1	引言	30
4.2	案例假設前提	30
4.3	模擬地震情境資料	31
4.4	管線災損率與破壞機率分布	33
4.4.1	管線災損率(Repair Rate, $R.R.$)	33
4.4.2	管線破壞機率	35
4.5	系統供氣能力	36
4.5.1	蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)	36
4.5.2	高風險之用戶需求端及開關閥	38
4.5.3	最快恢復供氣策略	39
4.6	天然氣網絡相依性評估與風險	41
4.6.1	天然氣網絡相依性評估—緊急避難之交通需求影響	41
4.6.2	天然氣網絡相依性評估—惡化震後火災	42
4.7	整體復原韌性	47

4.8	小結	47
Chapter 5	結論與未來建議	49
5.1	結論	49
5.2	研究限制與未來建議	50
參考文獻		52
附錄 Appendix		55
附錄一 開關閥關閉機率		55
附錄二 用戶需求端受影響機率		55



LIST OF FIGURES



Figure 1 韌性復原曲線 [2].....	3
Figure 2 ”4R”說明釋例 [2].....	4
Figure 3 液化天然氣供應流程圖[14].....	8
Figure 4 臺灣地區主要輸氣幹管及場站和燃氣電廠分佈[17].....	9
Figure 5. Influential network-relationship map(INRM)[46]	12
Figure 6 韌性考量因子.....	16
Figure 7 研究流程圖.....	17
Figure 8 上下游對應關係釋例.....	25
Figure 9 中洲構造斷層規模 6.9 地震情境震度分布[55].....	32
Figure 10 地震參數與天然氣管線網絡分布情況.....	34
Figure 11 管線災損率($R.R.$)	35
Figure 12 管線破壞機率(P_f).....	36
Figure 13 N_f 變異數收斂情形.....	37
Figure 14 高風險之開關閥與用戶需求端.....	39
Figure 15 單一次模擬供氣能力復原曲線.....	40
Figure 16 最快恢復供氣策略復原曲線.....	40
Figure 17 不同模擬次數 N 與供氣能力復原曲線標準差.....	41
Figure 18 緊急避難人口密度與管線所在道路緊急避難交通影響.....	42
Figure 19 人口密度分布圖.....	43
Figure 20 估計震後火災起火數分布圖.....	43
Figure 21 管線佔比分布圖.....	44

Figure 22	管線惡化震後火災風險.....	45
Figure 23	供氣能力 $Ser(t)$ 復原曲線.....	46
Figure 24	整體震後火災脆弱度指標 $I_{PEF}(t)$ 復原曲線.....	46
Figure 25	綜合韌性指標 $Q(t)$ 復原曲線	47



LIST OF TABLES



Table 1 桶裝瓦斯與天然氣比較(作者自行整理)	7
Table 2 管徑、管材災損率修正係數[51].....	19
Table 3 管線修復成本與時間參考[43].....	22
Table 4 管線修復對照表	23
Table 5 TELES 震災情境模擬傷亡情形	32
Table 6 地震情境參數	33
Table 7 平均災損與受影響用戶需求端數量	38
Table 8 高風險開關閥與用戶需求端機率	38

Chapter 1 緒論



1.1 研究背景與動機

目前人類生活對於各大基礎建設之依賴程度越來越高，而極端災害事件卻越來越頻繁，如何使這些重大基礎設施免於受到災害破壞成為重要課題。在災害管理中，“韌性 (Resilience)” 的概念被提出，表示系統或整體社會在損失及回復過程之功能性，各項研究不僅預估災害對重大基礎設施帶來之衝擊，其復原之過程也是關鍵，許多研究方法與韌性指標更是相繼提出。

除了考量的系統本身功能性表現外，相依性(Interdependency)亦是災害評估中相當重要的部分，尤其在現今高度發展之社會各系統環環相扣的情況下，一系統之損害往往對整體帶來更大範圍之衝擊，牽一髮而動全身，評估相依性之影響亦是現今災害管理中不可或缺的。

在現今科技高度發展的都市中，人們對維生管線(Lifeline)如電力、自來水、污水、瓦斯等更是日漸依賴，幾乎是生活不可或缺的一部分，目前大部分建設將這些管線埋設於地下，運送易燃、具危險性物質的管線更為高風險之災害因子，過去2014年高雄氣爆事故便是前車之鑑，事件導致了32人死亡、321人受傷，若缺乏適當管理與災害模擬研究將使這些地下管線變成造成嚴重災害的潛在因子。

在前述研究背景下，綜合韌性概念以及相依性因子並將復原修復過程納入評估分析之研究值得深入探討，因此本研究希望以具易燃危險特性的天然氣瓦斯管線作為研究主體，考慮天然災害中，對此類地下埋設管線影響最大的地震災害為災害背景，估計可能災損及影響範圍並考量修復過程，以及對於緊急避難交通影響與惡化震後火災風險之相依性，從系統功能與社區韌性角度分析評估。

1.2 研究目的與架構

根據研究背景與動機，以下為本研究之主要目的：

1. 提出系統韌性評估之架構。
2. 評估天然氣管線在地震災害下之損害，並考量搶修時需關閉開關閥帶來對整體系統供氣能力之影響。
3. 考量復原修復過程中供氣能力與其他系統間相依性(Interdependency)，量化整體系統社區韌性。
4. 針對不同目標提出復原修復策略，為決策者提供災前預防與災後因應之參考。

本論文章節組織架構如下：第一章為緒論，說明研究背景及目的，第二章為文獻回顧，對於過往相關之文獻和研究進行統整與討論，第三章為研究方法，統合先前研究並說明本研究進行方法，第四章以臺南市新化區作為案例分析，得出模擬災損及復原情況，最後第五章則是結論與建議。



Chapter 2 文獻回顧



2.1 引言

本章節針對過往國內外文獻及資料進行回顧作為研究背景，將統整目前研究之目的與採用方法，本章內容包含過往韌性與脆弱度的文獻回顧(2.2)、天然氣管線系統之特性與台灣的天然氣概況(2.3)、管線系統震災模擬的研究方法(2.4)以及相依性之探討(2.5)，從中分析其優缺點與目前缺乏之處作為研究動機，構築本研究架構並確立研究之目的、主題、方法。

2.2 韌性與脆弱度及韌性考量因子

2.2.1 韌性定義

“韌性 (Resilience)” 已經被用於許多領域，包含力學、生態學、社會學、經濟學 [1]。如今隨研究發展，將其作為表示在災害管理中，整體社會在損失及回復過程之功能性 [2]，如 Figure 1。其中“4R”說明了韌性的四種特性，分別是 Robustness, Redundancy, Resourcefulness, and Rapidity (the “4R’s”, Figure 2)。

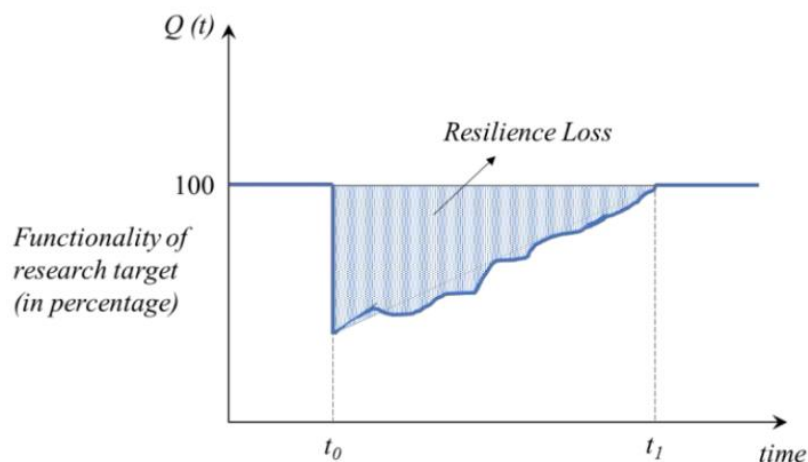


Figure 1 韌性復原曲線 [2]

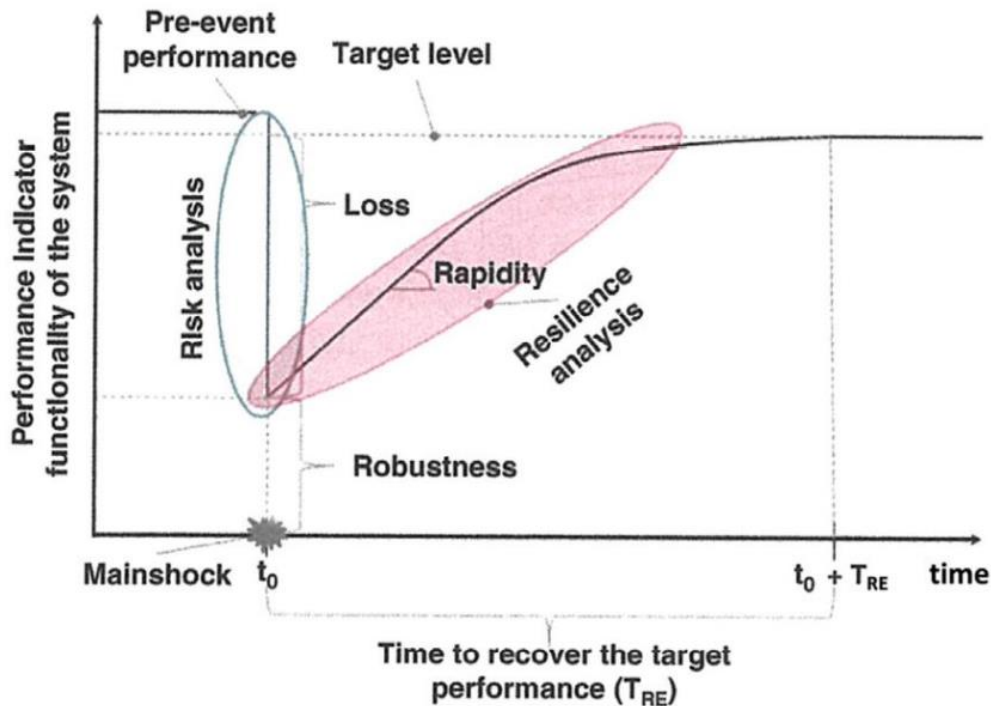


Figure 2 "4R"說明釋例 [2]

關於 4R's，具體描述如下：

1. Robustness: 抵抗特定種類衝擊之能力。

The ability to resist the impact of the specific subject.

2. Redundancy: 在既定衝擊下，替代資源或避免風險的能力。

Under given impact, the ability to alter resources or avoid risks.

3. Resourcefulness: 衡量適應性或敏捷性，感知影響然後做出反應。

It is likened to the models of being adaptive or agile, sense the impact and then make the responses.

4. Rapidity: 可以簡易定義為韌性函數之斜率，表示回復快速的程度。

It could be simply defined as the slope of resilience functions, which demonstrate the ability to quickly restore.



2.2.2 韌性與脆弱度比較

常與韌性比較的脆弱度 (Vulnerability) 亦有許多文獻提及 [1-6]，其內容主要包含受體 (Exposure) 以及調適能力 (Adaptive capacity)，其中受體指的是暴露在受災害區域中的標的物；而在相同災害衝擊下，調適能力越高，脆弱度則越低，反之則脆弱度越高 [1]。韌性的概念更多包涵了回復中的過程、採取的應變策略以及目標所表現的功能性。

2.2.3 韌性函數/曲線

韌性函數/曲線並不直接以回復力量值為縱軸，而是功能性 (Functionality) 對於時間的變化，需要利用曲線圖形來完整表達過程中的回復情形。隨著時間變化，功能性可能預期會超越原本的 100% [7]，評估持續成長的主題時可將原先受衝擊之成長曲線一同呈現能更實際的了解回復情形。

韌性函數/曲線可以被應用在各種尺度或層級之主題，大至整體社群小從單一數據，功能性可能會由於不同策略而在相同衝擊下有不同變化。就最簡易的主題來說，韌性曲線可以直接回報某項目在復原過程中的表現數值，如：電壓、儲存容量、受影響人口數等；隨著層級越高，越多複雜因子之間的關係需要納入考量。藉由建立不同層級的架構，使韌性因子間的相互關係更清楚，以便於決策者判斷或是模擬情境時釐清原因。

2.2.4 相依性與韌性考量因子

當以系統或整體社區等較高且複雜為考量目標進行韌性評估時，對於完整的韌性評估，不僅是呈現單一功能的數值表現，並且要將其在不同環境條件下所造成的相關影響也一併評估，是為相依性 (Interdependency)。以災害管理的角度而言，

除了當下災害所造成的直接效應外，接續引發的間接效應也應該納入評估；同時，因災害受影響群體的性質不同亦可能導致影響的程度有所差異，應視為韌性的考量因子之一，如人口年齡結構和中低收入戶等社會經濟資料。



綜合韌性相關文獻所提及之概念，本研究認為完整的災害韌性評估應包含相依性之探討和模擬災後的回復情形，並且制定相關指標量化為數值、或視覺化方式呈現以利於後續延伸應用或輔助決策。

2.3 天然氣管線系統

2.3.1 重大基礎建設與維生管線

現代社會中，災害不僅危及人身安全，對於重大基礎建設(Critical Infrastructure, CI)的衝擊也顯著地影響災後的民生生活水準，而其中人們對維生管線(Lifeline)如電力、自來水、汙水、瓦斯等更是日漸依賴，幾乎是生活不可或缺的一部分，因此，如何在災害後迅速復原這些維生管線成為重要的研究課題 [8]。

目前這些維生管線大多埋設於地下，從其可能導致的嚴重後果分析，運送易燃、具危險性物質的管線尤為高風險的不定時炸彈，2014 年高雄氣爆事故便是前車之鑑，其起因為運送工業用的丙烯管線洩漏，積累濃度過高而後發生氣爆意外 [9]。由於工業管線之分布地區較特定，本研究以同樣具易燃危險特性且分布範圍較廣之天然氣瓦斯管線作為研究目標，並考慮天然災害中，對此類地下埋設管線影響最大的莫過於地震，因此本研究針對地震為災害背景進行韌性評估，以達最實質效益之貢獻。

2.3.2 天然氣背景

如今全球能源議題討論熱烈，天然氣是多數國家面臨能源轉型時的過度發電

方案，目前臺灣所進口的天然氣有超過八成是用於發電，一般家戶民生用量則佔不到一成 [10,11]，石油季刊中也有學者提到目前臺灣的能源政策若要達成非核家園之目標，天然氣網絡的擴增是迫切需要的 [12]。

對於普通家戶，一般來說常與天然氣瓦斯相比較的桶裝瓦斯(液化石油氣, LPG)在成分、性質上有所差異，如下表 Table 1 所示：

Table 1 桶裝瓦斯與天然氣比較(作者自行整理)

	<u>桶裝瓦斯</u> (液化石油氣, LPG)	<u>天然氣</u>
成分	丙烷+丁烷	甲烷(90%以上)+ 乙烷+丙烷
來源	中油及其他瓦斯公司，依規定添加臭味劑	
比重	較空氣重、下沉	較空氣輕
用戶數 (統計至民國 111 年) [13]	435 萬戶	380 萬戶

目前台灣除了都市地區外，大多數民生用的家用瓦斯都以桶裝瓦斯為主，未來隨著天然氣網絡的擴增可能會慢慢轉變。

科學發展期刊中也介紹了臺灣天然氣從進口到運輸的整體流程(Figure 3)，由於台灣自身的天然氣蘊含量不足，須由國外以液化天然氣 (LNG) 方式進口，將天然氣以高壓壓縮成液態縮小體積後，由專門的運輸船以海運方式輸送進口，台灣的接收站港口分別在台中及高雄，氣化後再分別以陸上及海底長途管線輸送到各地 [14]。

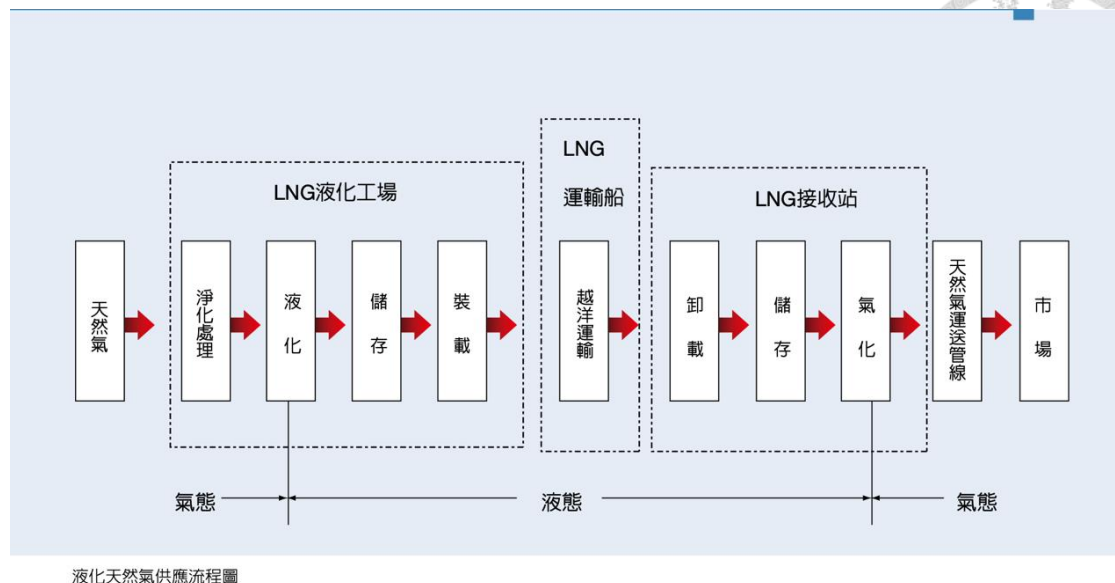


Figure 3 液化天然氣供應流程圖 [14]

石油季刊中簡介了目前臺灣天然氣需求市場包含 12 座燃氣電廠、25 家瓦斯公司、工業及民生用戶，兩座天然氣接受站實際進口量都已經超過規劃的營運量，設備利用率達 103%，相較於其他主要 LNG 進口國日本、韓國及中國分別為 43%、30%及 73%，顯示國內 LNG 輸儲設備利用率工作負荷過高，恐不利於天然氣穩定供應 [15]，目前國內第三座天然氣接收站也正在興建中以緩解天然氣供應問題。

除了能源政策轉型帶來擴增天然氣網絡的需要，臺灣礦業期刊亦有文章以經濟和儲存量的觀點分析，建立天然氣的系統動態模型，辨識相關的能源系統風險影響因子與因果關係互動關聯，將訂購及持有成本、風險等皆納入考量，建議應多元化供應合約來源、有效管理長短期合約組合，將有助於降低成本和減少風險 [16]。

2.3.3 天然氣供應架構與災害分析

天然氣供給之對象大至燃氣電廠小至民生家戶，不同供應層級之災害分析內容也有所差異，本研究在整理國內外相關文獻及資料蒐集過後，由於分析方法之適用性以及開放資料所提供之範疇，以貼近用戶需求端之中低壓管線網絡為分析主體，進行震災韌性分析。

相對於電力和自來水系統複雜而密集的網絡，天然氣管線除市區等一般家戶需求密集地區分佈較多之外，其餘多是少數幾條大管徑跨行政區的長途運輸管線，下圖為臺灣地區主要輸氣幹管及場站和燃氣電廠分佈(Figure 4)。



Figure 4 臺灣地區主要輸氣幹管及場站和燃氣電廠分佈 [17]

根據過往地震的歷史資料顯示(臺灣 921 集集、0206 美濃和日本 311 關東地震)[18-23]，跨縣市或是海底運輸之高壓大管徑天然氣管線不易單純因地震災害而破壞，此類型管線與地震相關的研究通常針對跨越斷層處的管線結構應力分析[24]。本研究希望探討管線與開關閥、用戶需求端之關聯在管線破壞時的影響，因此研究主體管線主要為中低壓管線、研究範圍約為行政區規模，以利進行分析評估。



2.4 管線震損模擬

2.4.1 地震災害模擬

有關於地震災害的模擬，有許多文獻和研究提出各種方法和模型進行，而大多數研究根據所在地區之分析主體（如廠站、管線等）耐震性質和地震情境下地震參數的空間分布與過去歷史災損資料進行迴歸分析得到之易損性曲線(Fragility Curve)，再用於模擬未來可能的災損情形 [25-33]。不同國家地區所得出之迴歸公式可能有所差異，也反映出各地不同的環境條件，即使以相同模擬架構流程應用於不同地區時，也應採用由當地歷史資料之迴歸公式更有代表性。

2.4.2 管線災損率

不僅限於天然氣系統，過往文獻及研究以管線作為分析主體多以管線災損率 (Repair Rate, $R.R.$) 作為模擬破壞或是評估風險之依據 [18, 29, 31, 34-39]，其單位為修復數/單位長度，代表的意義為單位長度內估計修復數，可由泊松分布(Poisson Distribution)推導出管線破壞之機率，進行後續風險相關評估。

關於管線災損率，各文獻及研究都提出了許多迴歸公式，例如美國聯邦緊急事務管理署(Federal Emergency Management Agency, FEMA) 所提出之 HAZUS [34]，此外，不同文獻所採用的地震參數也不盡相同，常見的為地表最大加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)、地表永久位移(Permanent Ground Deformation, PGD)、土壤液化機率等。各地區也會針對當地的歷史資料進行迴歸分析，以更加貼近不同地區之情況，如伊朗的天然氣網絡 [29]、臺灣也有文獻提出相關公式 [19, 30, 35, 36, 39]。

管線震損後續進行之分析亦有不同目標與方法，有以災前預防為目的將災損

率轉換為管線破壞機率進行管線風險分析 [37, 38, 40, 41]；亦有量化震害災損或評估後續影響來提供緊急應變對策做為參考 [2, 5, 7, 42]，以臺灣文獻為例，目前有研究將地震參數以 $500 \times 500\text{m}^2$ 網格分配並統計各網格內估計修復處資料形成天然氣管線之災害地圖(Hazard Map)，提供在地震情境下北台灣天然氣的災損情況預估 [30]。

2.4.3 管線復原修復

震災韌性評估中，除了在災前加強系統內各部件的耐震能力可以降低地震所帶來的損失，災後的回復過程是整體分析的重要部分，如何安排修復資源和優先順序對於整體韌性的表現有決定性的影響。

目前研究與文獻大多以量化指標對時間之變化來呈現回復過程，不同復原策略或是限制條件則會有不同的復原曲線(Restoration Curve) [5, 7, 8, 41, 42]。日前相關研究將天然氣震害災損量化時利用統計瓦斯公司所提供之歷史修復資料來具體量化修復所需時間與金錢 [43]，為本研究提供了很好的參照。考慮管線復原之過程可以使整體韌性研究更完整，在復原過程中亦可能與其他系統相互影響，對於相依性的評估也能從災害當下所造成之影響進一步延續。

2.5 天然氣系統相依性

相依性在現今基礎建設環環相扣和民生生活所必需之情況下越來越需要被重視，各類型文獻研究也陸續提出，例如對於輸水網絡在震災損壞下對震後火災供水影響的分析 [31]以及提倡需要系統中的系統(system of systems)概念來管理目前的基礎建設 [44]。對於相依性的分類和關係亦有文獻討論。



2.5.1 相依性分類與關係

直接/間接效應:

相依性之相關文獻中提到一衝擊(impact)所產生之效應可以被分作三類 [45]:

1. 直接效應 Directly dependent effects: 衝擊發生後直接造成影響的效應。
2. 一階效應 First-order effects: 在直接效應後緊接續擴散影響的間接效應。
3. 二階效應 Second-order effects: 經由間接效應後再延伸之影響效應，可能影響回來源本身 (adversely affect) 進而再度循環影響。

因果連結關係:

在災害發生或是衝擊造成後，各系統或者是系統中的項目間的連帶影響可能有因果關係，但通常需要人為根據實驗結果解讀與判斷，影響網絡關係圖(INRM)可以得到系統或項目彼此之間是影響對方或是被影響的象限圖，如 Figure 5。

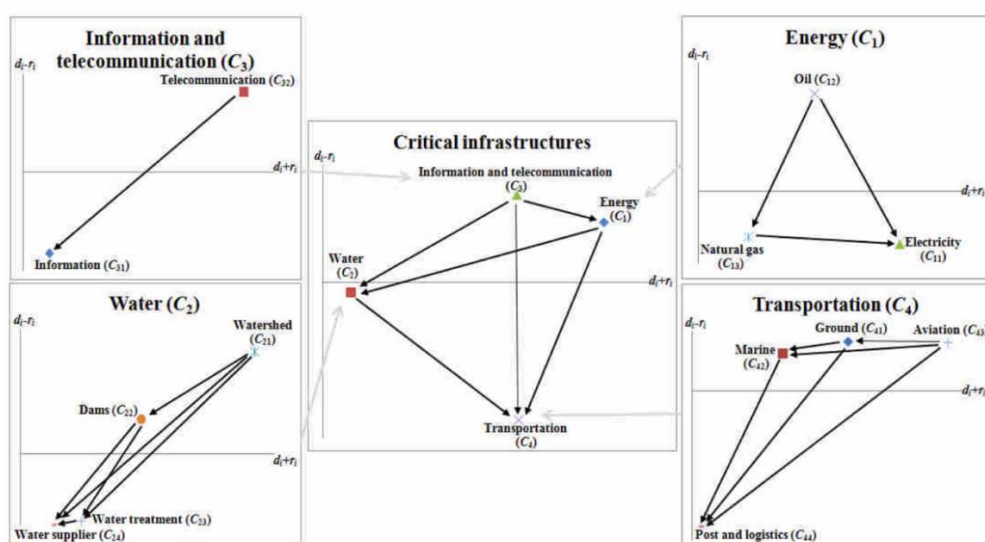


Figure 5. Influential network-relationship map(INRM) [46]

在統計資料足夠或是模擬模型中，各項目數據的相關性常會被用來檢視討論，進而判讀找出可能原因或是解釋，作者通常會提出自己的見解來說明，一些特別或

是超出預料的相關性可能引起更多衍伸的分析，增加更多新的研究主題。

相依性不一定只擴大災害或衝擊的影響，亦有文獻提出基礎建設相依性的增加也能夠讓系統間相互支援，使整體韌性提升 [47]，因此，釐清系統災害間的相依性關係才是研究之重點。

2.5.2 天然氣相依性類別

以天然氣網絡系統可能帶來的影響而言，以能源和二次災害(如氣爆風險)角度最廣泛被探討，例如日前研究有針對歐洲天然氣與電力之間的相依性，以燃氣電廠作為兩系統的介面，分析天然氣管線受損時可能對電力系統帶來的影響 [48]。

由於地震災害不僅可能損壞天然氣管線使易燃氣體洩漏，震後火災也是地震所帶來的潛在風險，兩者同時發生時可能引發氣爆，造成毀滅性的後果，因此震後火災之相關研究也需一併考量 [37, 38, 49, 50]，目前已有研究除了一般天然氣震災分析外亦包含了震後火災之部分 [38]，其他對於建築物中發生之震後火災則多以地震參數與歷史震後火災資料進行回歸得出近似公式。

除了天然氣管線受損造成二次災害或是對其他系統之影響，地震造成之其他災害也可能影響天然氣管線之修復過程，進而影響整體系統韌性之表現。

民國 112 年於新竹縣竹北市氣爆事件，因網絡內壓力失調以及部分管線老舊不堪負荷，於用戶端發生氣爆，此事件即顯現了瓦斯洩漏可能帶來之嚴重後果，若是同時加上地震所帶來其他的災害而減少救災可分配資源與人力，情況將更加惡劣，因此，從災前針對高風險管線或區域加強設備進行預防；地震災害當下根據災損情形作出緊急應變措施；以及災後制定修復策略以回復日常生活這三方面皆完整考量才能使整體系統韌性表現更加完善。



2.6 小結

目前研究與文獻對於韌性、天然氣管線系統、基礎建設相依性等皆有許多發展與討論，可以借鏡各學者所提出之方法與研究架構流程，綜合得出本研究之研究方法。有鑑於多數文獻單純考慮災害下管線及相依性系統災損情形；或提出功能性量化指標，著重於回復過程之系統韌性呈現，綜合考慮相依性與回復過程之天然氣管線震災韌性分析可以更完整地考量實際情況，以及開放資料所能蒐集之範疇，訂定本研究主題。

本研究以具易燃危險特性且貼近用戶需求端之中低壓天然氣瓦斯管線作為研究目標，針對地震為災害背景，並考量修復過程與相依性，從系統功能與社區韌性角度分析評估。

Chapter 3 研究方法



3.1 引言

本研究將天然氣瓦斯管線作為研究主體，針對地震為災害背景，並考量修復過程，從系統功能與社區韌性角度分析評估，以此制定研究架構。本章將先建立整體系統社區韌性架構與研究流程(3.2、3.3)，接著說明研究假設前提與地震情境下管線破壞的模擬方法(3.4、3.5)，再闡述供氣能力評估和相依性之量化方式(3.6、3.7、3.8)，最後是復原策略依據(3.9)並對研究方法統整小結(3.10)。

3.2 整體系統社區韌性架構

進行韌性評估時，由於有眾多因素皆可能產生不同程度之影響，將這些韌性考量因子資料分門別類並綜合得出韌性指標顯得尤為重要。根據不同的資料數據類別，整體系統社區韌性由三種類型資料組成(Figure 6)：主題系統、環境、災害。在本研究中，它們分別是天然氣網絡、地震、社區與其他系統資料，同樣的架構可以用於評估其他災害或系統。

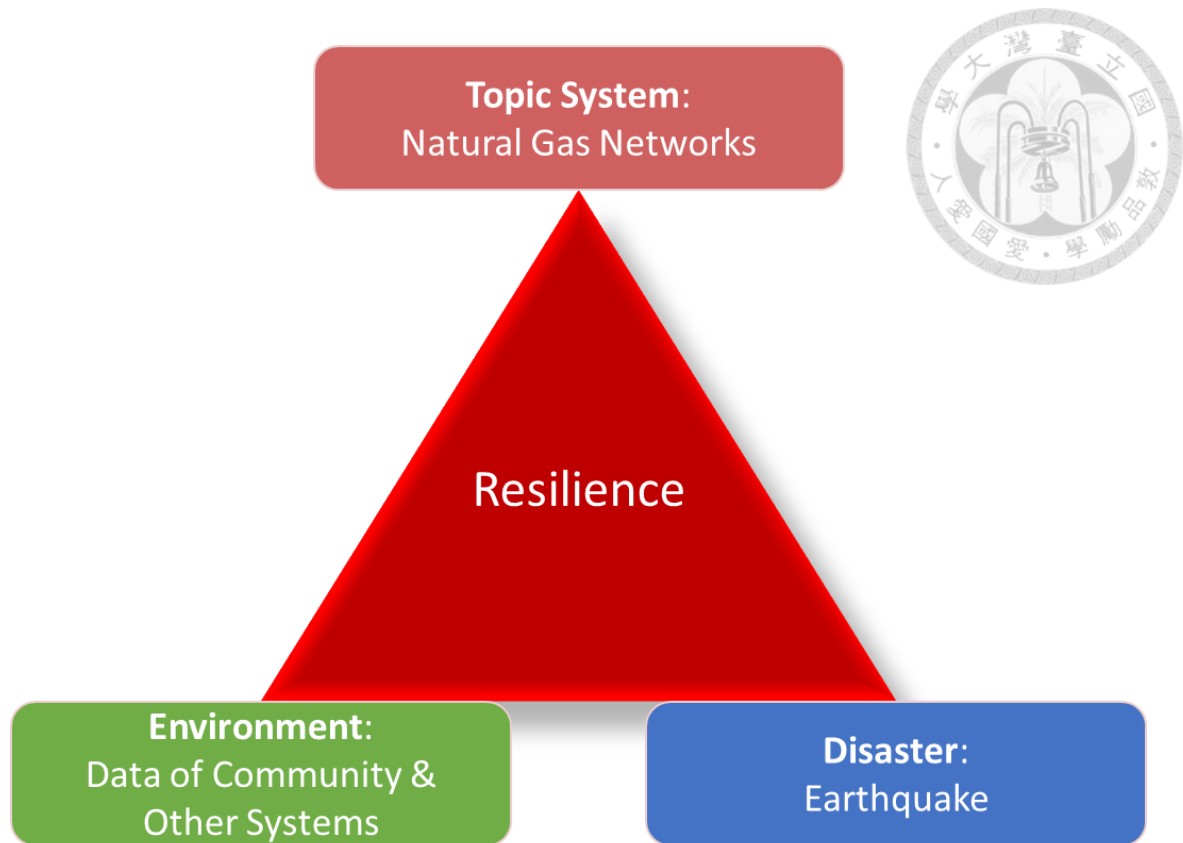


Figure 6 韌性考量因子

3.3 研究流程

在分析震災系統韌性的基礎下，本研究之流程整合利用地震參數、天然氣網絡地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS)與其他社區環境資料進行分析評估。天然氣網絡地震災害採用管線災損率(Repair Rate, $R.R.$)和蒙地卡羅模擬 (Monte Carlo simulation)方法，並配合其他社區環境資料與天然氣網絡之相依性得到整體系統之韌性與風險。

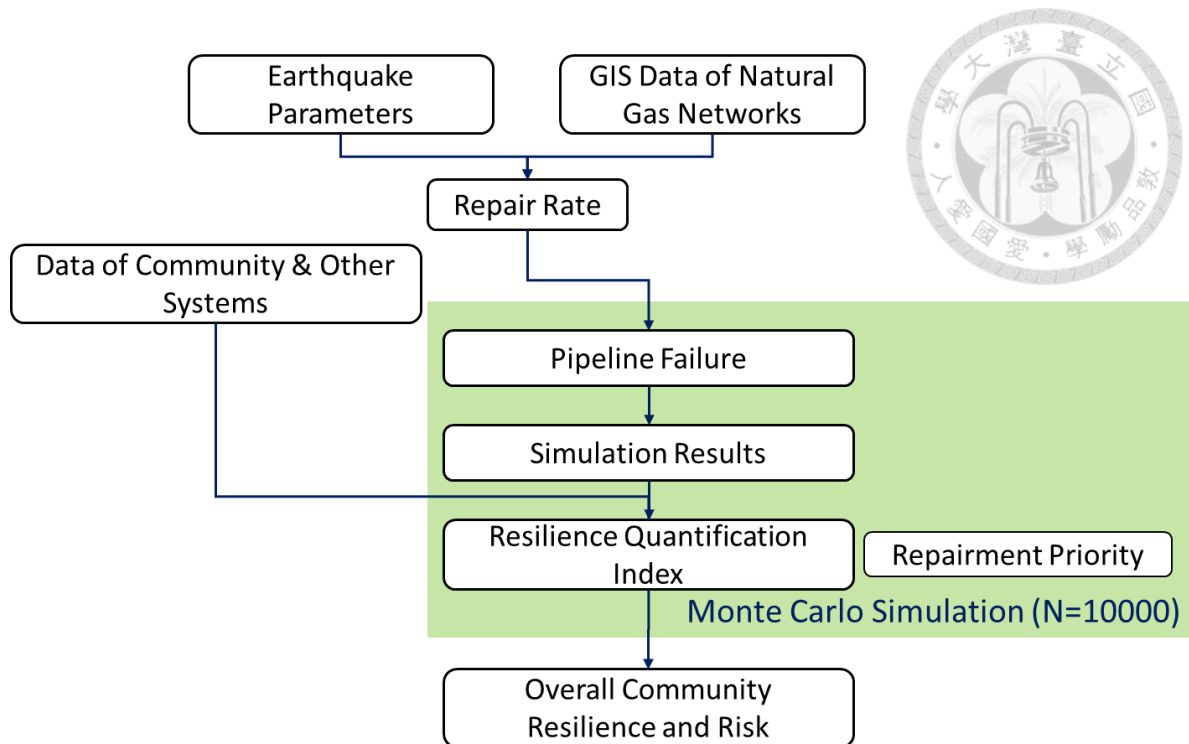


Figure 7 研究流程圖

如流程圖所示，天然氣管線的地震風險評估包括以下步驟：首先，從地震參數圖層和天然氣網絡的 GIS 資料疊圖分析得出管線災損率(Repair Rate, $R.R.$)，接著進行蒙地卡羅模擬(Monte Carlo simulation)，得到每次模擬之管線破壞情形，基於管線破壞模擬結果和天然氣網絡的相依性資料，獲得管線之災損風險以及整體網絡之韌性量化指標，根據指標可以排定修復優先順序以接續模擬復原過程，最終，根據多次模擬的結果得出整體社區的系統復原韌性。以上所提出的研究流程架構已應用於臺南市新化區的天然氣網絡作為案例研究。

3.4 研究假設前提

本研究根據研究目的、資料蒐集以及研究方法之適用性，需進行適當的假設與簡化，以下為本研究方法之假設前提：

1. 以中低壓管線為分析模擬之對象：

由於研究方法管線災損率之適用性，以及研究內容考慮對用戶需求端的影響，因此以中低壓天然氣瓦斯管線作為研究主體，不考慮高壓大管徑之管線，並以管線編號作為管線分類之標準。



2. 天然氣來源供應正常:

根據天然氣供應架構，天然氣瓦斯供應至研究範圍需從接收站氣化後再由高壓管線輸送至各供應地區廠站，由於本研究著重於地震災害對中低壓管線輸送至用戶需求端之影響，假定天然氣輸送至各地廠站之過程供應正常且穩定。

3. 開關閥皆正常運作、管線破壞即關閉對應開關閥:

本研究為探討管線受損後關閉對應開關閥造成之影響，故將關閉對應開關閥視為管線受損後即作用之機制，不在災害受損之範圍內；另外，由於天然氣為易燃具危險性之氣體，並不如自來水管線在管線輕微受損洩漏時仍能應急供應，天然氣管線一旦受損就必須關閉開關閥等待搶修完成後方能恢復供氣。

4. 修復過程逐處搶修:

管線修復將依照採用之恢復策略或是綜合韌性指標排定修復順序，實際搶修資源較多時可以同時多處搶修，本研究為了呈現每修復一處後整體韌性指標之變化與回復過程，因此假設過程為逐處修復。

3.5 管線破壞模擬方法

3.5.1 地震情境與參數

本研究之地震情境與參數以臺灣地震損失評估系統(Taiwan Earthquake Loss

Estimation System, TELES)軟體進行震災相關設定及模擬後，輸出地震參數圖層至 QGIS 軟體中應用，TELES 軟體中已考量臺灣地區地表震動強度之震度衰減率、場址效應修正及實測紀錄修正等，將其地震參數圖層與天然氣網絡 GIS 資料進行疊圖分析後即可得到管線災損率，以進行後續分析評估。

3.5.2 管線災損率公式

本研究模擬管線破壞情形採用管線災損率(Repair Rate, $R.R.$)，公式參考自經濟部水利署公共給水原水導管地震風險評估技術研究 [51]，單位為修復處/每公里，最大地表加速度(PGA)和永久地表變位(PGD)之對應公式分別如下：

$$RR_{PGA} = 4.5 \cdot C_{S-PGA} \cdot C_T \cdot (PGA - 0.1)^{1.97} \quad (3-1)$$

$$RR_{PGD} = 0.04511 \cdot C_{S-PGD} \cdot C_T \cdot PGD^{0.728} \quad (3-2)$$

其中 PGA 單位為 g，PGD 單位為公分。 C_{S-PGA} 、 C_{S-PGD} 為管徑修正係數， C_T 為管材修正係數。當 PGA 值低於 0.1 時，視為地表震動強度不足以使管線受損， $RR_{PGA} = 0$ 。管徑以及管材修正係數如 Table 2 所示：

Table 2 管徑、管材災損率修正係數 [51]

管材分類	C_T	管材	說明
T2	0.63	金屬管	以 Twater 中 T2、T3 分類做為參考
T3	1.00	非金屬管	
管徑分類	標稱管徑(mm)	C_{S-PGA} 管徑-PGA 修正係數	C_{S-PGD} 管徑-PGD 修正係數
S1	<100	2.00	2.00
S2	100-200	0.70	1.00
(內插)	200-250	0.45	0.75
S3	250-450	0.20	0.50
(內插)	250-500	0.14	0.38
S4	500-750	0.08	0.25



由於管徑較大之管線通常較不易因地表震動而損害，但難以抵抗地表變位所造成的破壞，故管徑修正係數分為 C_{S-PGA} 以及 C_{S-PGD} 。將管徑與管材修正係數代入後，考慮地表震動、斷層破裂或者土壤液化引發的地表變位對於管線災損率之貢獻，天然氣管線的災損率公式推估如式(3-3) [51]:

$$RR = \max \left(RR_{PGA}, p_{fault} \times RR_{PGD(fault)}, p_{lqf} \times RR_{PGD(lqf)} \right) \quad (3-3)$$

上式中，斷層破裂以及土壤液化引發的地表變位需乘遭遇機率 p_{fault} 或 p_{lqf} ，由上式各項所得之最大值為控制管線破壞的災損率，根據臺灣地震損失評估系統(TELES)之技術手冊中說明 [52]，其街廓地震參數圖層之 Pgd_fault 數值已考慮遭遇機率之影響，因此將其代入 RR_{PGD} 公式後即視為由斷層破裂地表變位所引致的管線災損率；土壤液化機率 p_{lqf} 與其引發的地表變位則分別有提供，按上述公式運算。將地震參數圖層與管線 GIS 資料疊圖分析獲得各管線災損率後即可進行後續應用與模擬。

3.5.3 管線破壞機率

實際管線破壞情形呈現泊松分布(Poisson Distribution)，如式(3-4)所示：

$$P(X = k) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^k}{k!} \quad (3-4)$$

此處機率函數 $P(X = k)$ 表示管線有 k 處破壞之機率，其中 k 表示破壞個數、 λ 為災損率乘上管線長度(單位為公里)，得到一估計修復數(Repairs)，亦為泊松分布之期望值。故若要得到管線破壞之機率，則計算機率函數 $P(X = k)$ ，在 $k=1,2,3,\dots$ 所有正整數情況下之和，意即以全機率一扣除完全無破壞($k=0$)之情況，得到管線破壞機

率 P_f 。

$$\begin{aligned} P_f &= 1 - P(X = 0) \\ &= 1 - e^{-\lambda} \end{aligned} \quad (3-5)$$

又因 $\lambda = RR \times L$ ，

$$P_f = 1 - e^{-RR \times L} \quad (3-6)$$

由政府資料開放平台下載天然氣系統如廠站、管線、開關閥分布等相關圖資資料後，將其與 TELES 所輸出之街廓地震參數圖層一併輸入至 QGIS 軟體中進行疊圖分析，以管線編號作為管線分界之標準，一條管線可能行經不同街廓地震參數圖層區域而被分割，因此實際進行疊圖分析時，分割之管線各自算出其災損率後，配合分割後的長度得到估計修復數 λ (Repairs)，統計同一管線編號之估計修復數加總，並由泊松分布得到管線之破壞機率 P_f 。

本研究為探討不同管線受損後造成之影響，可能進行之方法如數學風險期望值計算或是以蒙地卡羅隨機變數模擬，其優點為可統計變數所帶來不確定性(uncertainty)之影響、產生實際可能發生之情形進行後續研究；而蒙地卡羅模擬潛在之缺點為進行大數法則所需之計算成本高，但本研究經由案例分析測試後管線破壞數量在模擬次數 $N > 5000$ 後即開始收斂，最終選擇 $N = 10000$ 也較常見之模擬次數為少，計算成本與時間皆在可接受之範圍；以數學分析求解角度反而需將每條管線受損之後果先計算完畢，且風險期望值計算無法討論就單一災損模擬結果如極端案例進行討論，因此選擇以蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)方式來進行。

天然氣系統管線破壞之分佈情況以蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation, $N = 10000$)進行，以各管線編號之統計加總估計破壞數 λ 為參數，由 MATLAB 軟體

中隨機變數 poissrnd 函式生成模擬管線破壞個數 N_f 如式(3-8)。管線發生破壞時，需關閉對應的開關閥，以待後續進行修復後使得開啟恢復正常運作，關閉開關閥會造成其餘正常管線以及用戶需求端受到影響，在模擬管線破壞情形時，配合管線、開關閥、用戶需求端之間的對應關係，即可統計各開關閥關閉和用戶需求端受影響之機率。

$$N_{f,j} = \text{poissrnd}(\lambda_j), j \in \text{all pipelines} \quad (3-7)$$

3.5.4 管線修復成本

管線破壞後需進行搶修，根據受損管線的管材、管徑等，花費的金額以及所需時間將有所差異。本研究參考洪泰昌(2004)[43]以及經濟部水利署公共給水原水導管地震風險評估技術研究 Twater 之資料進行彙整，參考其中瓦斯公司提供之修復紀錄，以鑄鐵管(CIP)和 PE 管分別作為本研究金屬、非金屬管材之參考、管徑大小也參照其分類標準如下表 Table 3 所示，本研究模擬管線回復情形之條件即以各管種平均工班人數與修復時間為準；小管徑之金屬管(被覆鋼管)則參考 Twater 管線破壞形式機率計算修復時間與金錢之期望值。由於參考之文獻資料時間為 2004 年，距今時間較長，已考量通貨膨脹之現象，利用營造工程物價指數將總費用轉化為目前現值(Table 4)。

Table 3 管線修復成本與時間參考 [43]

管種*	人數/工班	工班*小時/處(小時/處)	人*小時/處(小時/處)	總費用(NTD/處)
CIP 大管徑	4	14.9	59.6	94,147

CIP 中管徑	4	12.2	48.8	58,119
PE 大管徑	3.75	7.6	28.8	48,650
PE 中管徑	2.6	4	10.4	7,799
PE 小管徑	2	2	4	3,700

*註:CIP 大管徑:150mm 以上、CIP 中管徑:80mm~100mm、PE 大管徑:6"以上、PE 中管徑:3"~4"、PE 小管徑:2"以下

Table 4 管線修復對照表

管種	工班*小時/處(小時/處)	總費用(NTD/處)
金屬大管徑	14.9	156,829
金屬中管徑	12.2	96,826
金屬小管徑	3.85	17,600
非金屬大管徑	7.6	81,051
非金屬中管徑	4	12,993
非金屬小管徑	2	6,164

3.6 天然氣系統供氣能力評估

3.6.1 上下游對應關係

當天然氣管線在地震災害中受損，由於管線、開關閥和用戶需求端之間存在對應關係，其影響會進一步擴大。首先，需要關閉受損管線上游對應的開關閥，這會切斷其他正常管線的供氣，隨後，與其相對應下游的用戶需求端會受到影響，導致整體供氣能力下降，如 Figure 8 (a)變換至 Figure 8 (b)，其中黑色管線與節點表示未正常供氣。此對應關係是至關重要的，因為它決定了管線受損後的影響範圍。

在搶修管線完畢後，對應之開關閥使得開啟並恢復供氣如 Figure 8 (c)，若開關閥對應之受損管線不只一條時，則須待所有對應之管線修復完畢後才能開啟開關閥並恢復供氣，因此天然氣網絡之上下游對應關係不僅確立了災害當下之受影響範圍，亦在回復過程中決定恢復供氣的時機點。

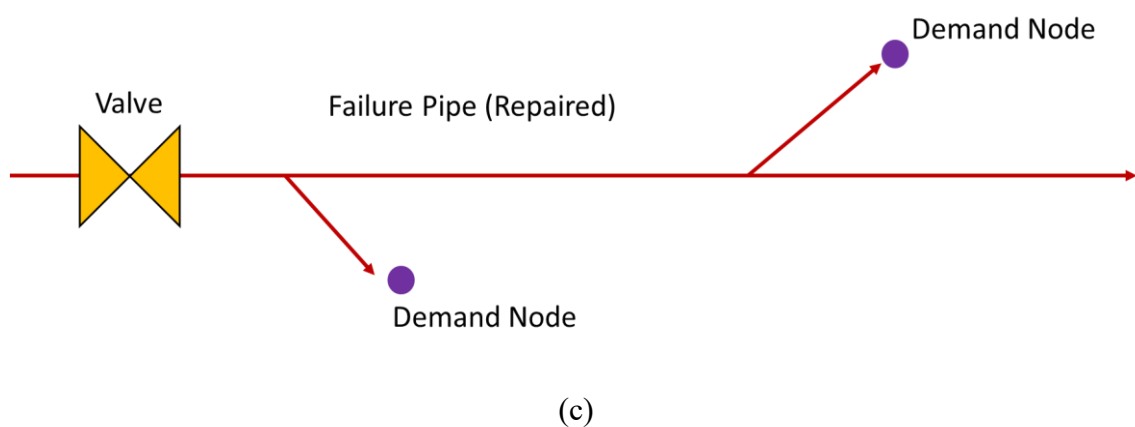
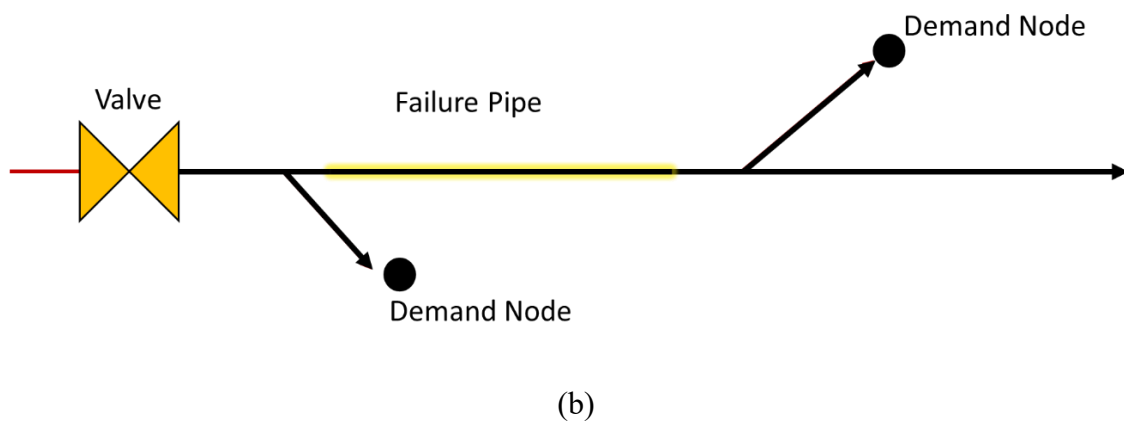
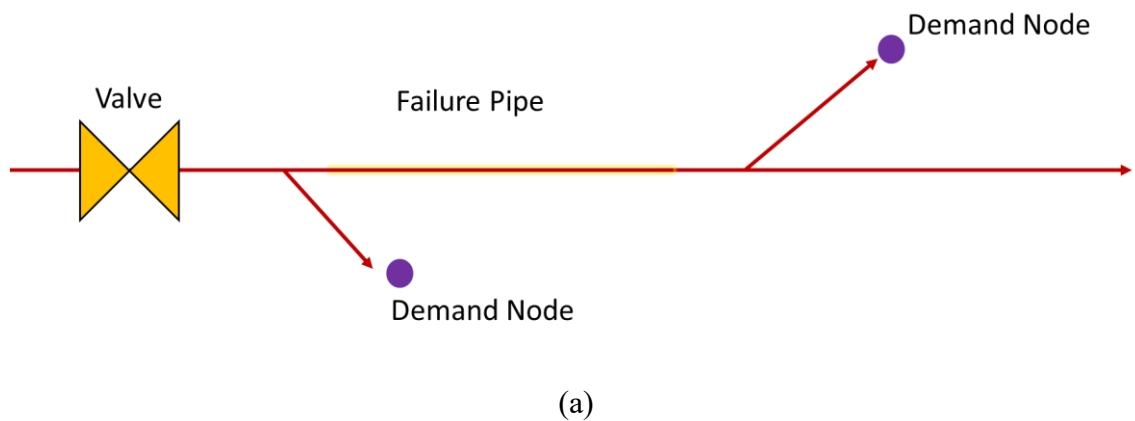


Figure 8 上下游對應關係釋例



3.6.2 供氣能力指標

為了衡量在地震情境下，整體天然氣網絡之供氣能力與回復過程中的復原情形，本研究以正常供氣未受影響之用戶需求端佔整體供氣範圍之比例作為供氣能力之指標 $Ser(t)$ ；而在回復過程中，此指標亦能反映整體天然氣網絡在不同時間點之供氣能力，如式(3-8)所示。

$$Ser(t) = \frac{N_n(t)}{N_{total}} \times 100\% \quad (3-8)$$

其中 $N_n(t)$ 為正常供氣之用戶需求端數量、 N_{total} 為研究範圍內所有用戶需求端數量。當 $t = 0$ 時， $N_n(0)$ 表示災害當下正常供氣之用戶需求端數量、 $Ser(0)$ 則表示災害當下系統供氣能力。

3.7 天然氣網絡相依性—緊急避難之交通需求影響

當地震災害發生後，可能會產生緊急避難之需求，而此需求需依賴交通進行疏散，目前大多數公共建設之管線接埋設於道路地下，倘若受損管線所在之道路過早進行搶修，可能會導致所在道路無法負擔緊急避難之需求，因此對於管線修復而言，此需求將對其修復優先順序產生影響。

在地震情境下，由 TELES 輸出之地震參數圖層包含了各街廓之緊急避難人口，代表在地震情境下各街廓中部分建築物損害導致需要撤離避難之人數，本研究將其除以街廓面積呈現其平均情況，以街廓之緊急避難人口密度 ($D_{Shelter,i}$) 和管線所在道路之車道數 (N_{Lane}) 作為衡量緊急避難交通影響指標 (Tf_{De}) 之因子，加總管線所經街廓之緊急避難人口密度 ($D_{Shelter,i}$) 後除以管線所在道路之車道數 (N_{Lane}) 作為衡量

緊急避難交通影響指標(Tfc_{De})如式(3-9)，優先修復緊急避難交通影響較低之管線，在盡可能降低影響緊急避難情形下加速整體網絡之復原。

$$Tfc_{De} = \frac{\sum_{block\ i} D_{Shelter,i}}{N_{Lane}}, i \in \text{blocks which pipeline go through} \quad (3-9)$$

3.8 天然氣網絡相依性—惡化震後火災

3.8.1 惡化震後火災風險

天然氣管線破壞之影響範圍很可能超出了天然氣網絡本身。透過整合來自社區和其他系統的資料來評估天然氣網絡之相依性可能造成之影響。以震後火災惡化風險而言，將管線行經街廓之人口密度(D_i)、震後火災起火數($N_{ig,i}$)和管線佔比($R_{p,i}$)納入考量，其中人口密度(D_i)與震後火災起火數($N_{ig,i}$)資料來自 TELES 輸出之地震參數圖層，管線佔比($R_{p,i}$)則以街廓內管線總長度除以街廓面積之平方根化作無因次參數，透過整合以上因素作為惡化震後火災因子(I_w)和管線破壞機率(P_f)，可以得到每條管線在地震情境下的惡化震後火災風險(R_{PEF})，如下列式(3-10)、(3-11)計算：

$$I_w = \sum_{block\ i} D_i \times N_{ig,i} \times R_{p,i}, i \in \text{blocks which pipeline go through} \quad (3-10)$$

$$R_{PEF} = P_f \times I_w \quad (3-11)$$

3.8.2 惡化震後火災脆弱度指標

模擬回復過程中，整體惡化震後火災脆弱度指標($I_{PEF}(t)$)為加總受損管線破壞

個數 N_f 乘上惡化震後火災因子(I_w)之數值，如式(3-12)，並會隨管線修復完成而降，顯示整體網絡在惡化震後火災方面之量化數值。

$$I_{PEF}(t) = \sum_{pipe\ j} N_{f,j} \times I_{w,j}, j \in failure\ pipelines\ at\ t$$

(3-12)

3.9 復原策略與回復指標

3.9.1 特定策略復原

地震情境下，根據受損管線之各項指標可以排定修復管線之順序，依據不同的目標，可以依照其相對應之指標排序修復管線。

1. 最快恢復供氣:

此策略之依據為天然氣網絡之上下游對應關係，進行管線修復排序，由供氣來源之上游逐處修復至下游，並依序開啟對應開關閥，此方式可確保用戶需求端在最短之時間內恢復供氣。

2. 緊急避難交通影響:

考量有些受損管線所在道路需容納緊急避難之交通需求，無法立即進行管線修復工作，此策略之排序依據是由緊急避難交通影響($Tf_{c_{De}}$)之量值大小決定，由影響小之管線依序開始修復，在優先滿足緊急避難交通需求的情況下儘速修復管線。以相依性之觀點，此為其他系統(交通)之需求影響天然氣網絡之修復。

3. 降低惡化震後火災:

由於天然氣危險易燃之特性，若管線受損時有大量氣體外泄，則有惡化震後火災之風險，由受損管線個別之惡化震後火災指標排序，從指標量值最

大之管線開始修復，以最快速度降低整體惡化震後火災指標($I_{PEF}(t)$)。在相依性概念中，天然氣之修復影響了震後火災之潛在後果。



3.9.2 綜合韌性量化指標

綜合以上考量管線網絡供氣能力以及相依性之指標，整體韌性指標 $Q(t)$ 包含了供氣能力、對緊急避難交通之影響、惡化震後火災因子，如下式(3-13)所示：

$$Q(t) = Ser(t) \times \left[1 - \frac{\sum_{Repairing} Tfc_{De,t}}{\sum_{All\ pipes} Tfc_{De}} \right] \times \left[1 - \frac{I_{PEF}(t)}{\sum_{All\ pipes} I_w} \right] \quad (3-14)$$

其中 $Ser(t)$ 為在時間 t 時之整體天然氣網絡供氣能力；中間中括號內則用來衡量對於緊急避難交通之影響，分數分子部分 $\sum_{Repairing} Tfc_{De,t}$ 為正在維修管線之緊急避難交通影響量值，分母 $\sum_{All\ pipes} Tfc_{De}$ 表示整體網絡管線所在道路之緊急避難交通容量，以扣除呈現管線所在道路能夠正常供應緊急避難交通之比例，作為緊急避難交通之影響；後方中括號內是考量惡化震後火災因素，分數分子部分 $I_{PEF}(t)$ 為在時間 t 時整體天然氣網絡惡化震後火災指標，分母 $\sum_{All\ pipes} I_w$ 則是所有管線之惡化震後火災因子，同理以扣除表示在時間 t 時整體天然氣網絡管線未造成惡化震後火災因素之比例，作為考量惡化震後火災部分。由此整體韌性指標 $Q(t)$ 亦可以得到復原曲線，並且能更完整地呈現考量過各項因素之整體表現。

3.10 研究方法小結

本研究由整體系統社區韌性架構，制定研究流程以及各步驟之研究方法。以管

線災損率為參數進行管線震災破壞模擬，考量網絡間管線、開關閥和用戶需求端之對應關係，將天然氣網絡之供氣能力以及其相依性因素納入考量，分析出各管線之潛在風險，並且在實際模擬破壞情境中依照不同復原策略依據排定管線修復順序得出不同的復原曲線，以及訂定綜合韌性量化指標作為整體系統之災損與復原情形評估。此研究方法將於第四章案例分析中以具體資料套用評估。

Chapter 4 案例分析



4.1 引言

根據上一章所制定的研究流程與方法，本章將以具體案例的資料代入並分析評估。由政府公開資料以及臺灣地震損失評估系統(TELES)所得研究所需之背景資料，盡可能考量研究之完整性與精確性，臺南市為較早公開相關管線圖資之縣市，其中主要市中心和人口稠密之行政區網絡複雜、上下游關係不明確，在其他管線行經之行政區中，新化區之天然氣管線較具規模、不容易直接觀察出管線受損後對應造成之影響，因此，將以臺南市新化區作為研究區域，並以中洲構造斷層發生芮氏規模 6.9 之地震作為災害情境，對天然氣管線網絡進行震災風險與韌性分析。

本章節將先就所蒐集之背景資料進行適度假設與簡化(4.2)，並說明地震情境及各項參數(4.3)，接著呈現研究區域內按照研究方法所得之管線災損率於地圖上之分布情形(4.4)，以及模擬管線修復過程時整體管線網絡之供氣能力和各項相依性指標(4.5、4.6)，最後以綜合韌性指標(4.7)評估整體天然氣網絡於地震情境下之災損與復原狀況。

4.2 案例假設前提

本研究根據案例資料之完整性、以及套入研究方法之適用性，需進行適當的假設與簡化，以下為案例分析之假設前提：

1. 管線末端皆假設為用戶需求端：

由於蒐集公開資料 [53]研究區域內臺南新化區之天然氣用戶只有 11 戶，但相比於整體中低壓管線網絡規模可能尚有其他缺漏或是未公開之用戶，因此假設其他管線末端並未接入廠站或原先用戶處為一用戶需求端，在

此假設條件下，研究範圍臺南市新化區之用戶需求端為 56 戶。

2. 管線分布連續性:

由政府資料開放平台 [53]所下載之管線 GIS 圖資內容(統計自民國 110 年)包含許多管線屬性資料如管徑管材等，唯少部分管線在地圖中並未與其他管線或廠站連接，本研究已根據周圍管徑和管材相同之管線手動將其串聯，並參考其他管線圖資網站以盡可能確保整體網絡上下游對應關係之正確性；若周遭無其他可能為其上下游之管線，或是由其他行政區延伸至研究區域內，則如同研究方法所假設其來源穩定供應進行後續研究。

3. 管線材質適用:

本案例分析中管線 GIS 圖資對於管線材質之分類大致只有分為金屬管與非金屬管，本研究於管線災損率公式管材修正係數對應水利署 Twater [51]所分類之 T2 與 T3(Table 2)；修復管線時間與金額部分則參考文獻所提出管線歷史維修紀錄中 PE 管與 DIP 管資料後考慮通貨膨脹調整(Table 4)。

4.3 模擬地震情境資料

本研究根據所蒐集資料完整性和確保網絡複雜程度不致影響精確性，以臺南市新化區作為研究區域，地震情境亦選擇位於南部區域之中洲構造斷層，模擬之地震規模為芮氏規模 6.9，臺灣地震模型機率式地震風險評估(TEMP SHA2015) [54]報告中指出，中洲構造未來 30 年內將有 24%的機遇發生規模 6.9 地震，內政部亦曾以此地震情境作為災害背景提出消防救災方案 [55]，說明其具有足夠代表性。地震震度分布如 Figure 9 所示，由臺灣地震損失評估系統(TELES)模擬之傷亡分布情形則如 Table 5，其他詳細地震情境參數表列於 Table 6。

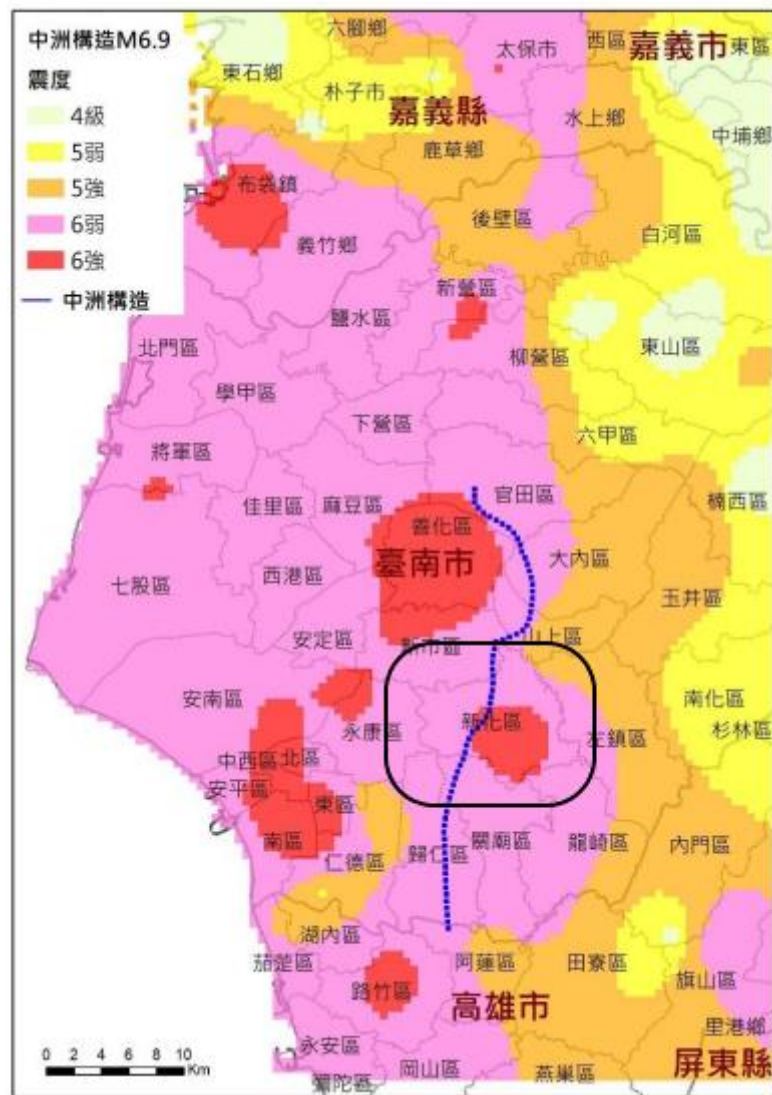


Figure 9 中洲構造斷層規模 6.9 地震情境震度分布 [55]

Table 5 TELES 震災情境模擬傷亡情形

名稱	輕傷(不須住院)	中傷(需住院)	重傷(命危)	死亡	傷亡和
臺南市新化區	189	85	54	40	94
臺南市總和	2374	1005	628	460	1088



Table 6 地震情境參數

Parameter	Numerical value
Scenario code	CCS69
Earthquake magnitude	Mw 6.9
Earthquake moment	$2.82 \times 10^{19}(\text{Nt-m})$
Fault length/fault width	29.2(km)/24.0(km)
Fault area	700.8(km ²)
Fault plane	13°
Dip/rake	30°/90°
Rupture velocity	2.4(km/s)
Displacement	1.15(m)
Asperity	Length: 10.59(km) Area: 112.13(km ²) Displacement: 2.01(m)

4.4 管線災損率與破壞機率分布

4.4.1 管線災損率(Repair Rate, *R.R.*)

將管線 GIS 圖資與臺灣地震損失評估系統(TELES)輸出之地震參數圖層匯入 QGIS 軟體進行疊圖分析(Figure 10)並依照研究方法 3.5.2 之公式運算後可得到管線災損率(Repair Rate, *R.R.*)，如 Figure 11 所示，管線災損率與管徑、管材和所在位置地震參數相關，大致來說其位於地圖上的分布與地震參數之變化相似，距離震央較近、震度較大之處管線災損率較高，但仔細觀察可以發現圖中有些災損率分布不連續之片段，如 Figure 11 之放大圖，為小管徑之分支管，由於其管徑和管材之原因，其管線災損率較周遭主要管線更高。

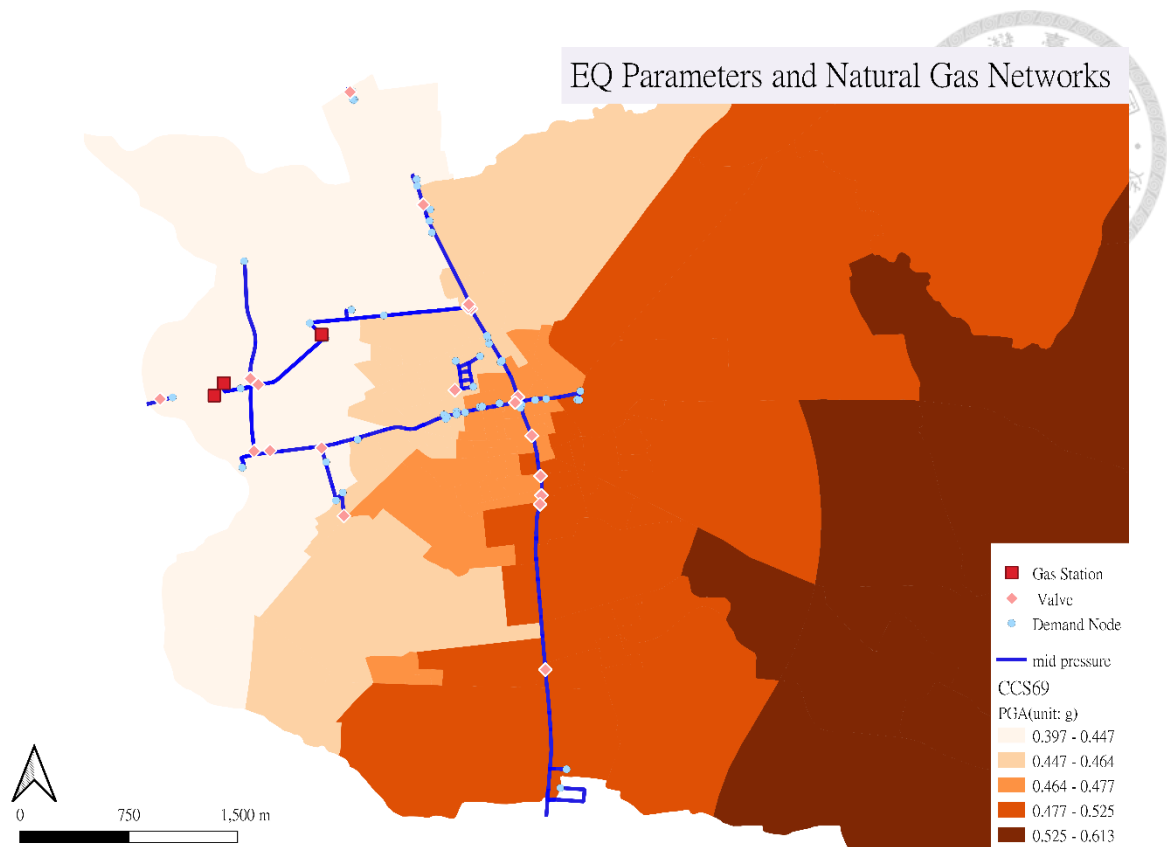


Figure 10 地震參數與天然氣管線網絡分布情況

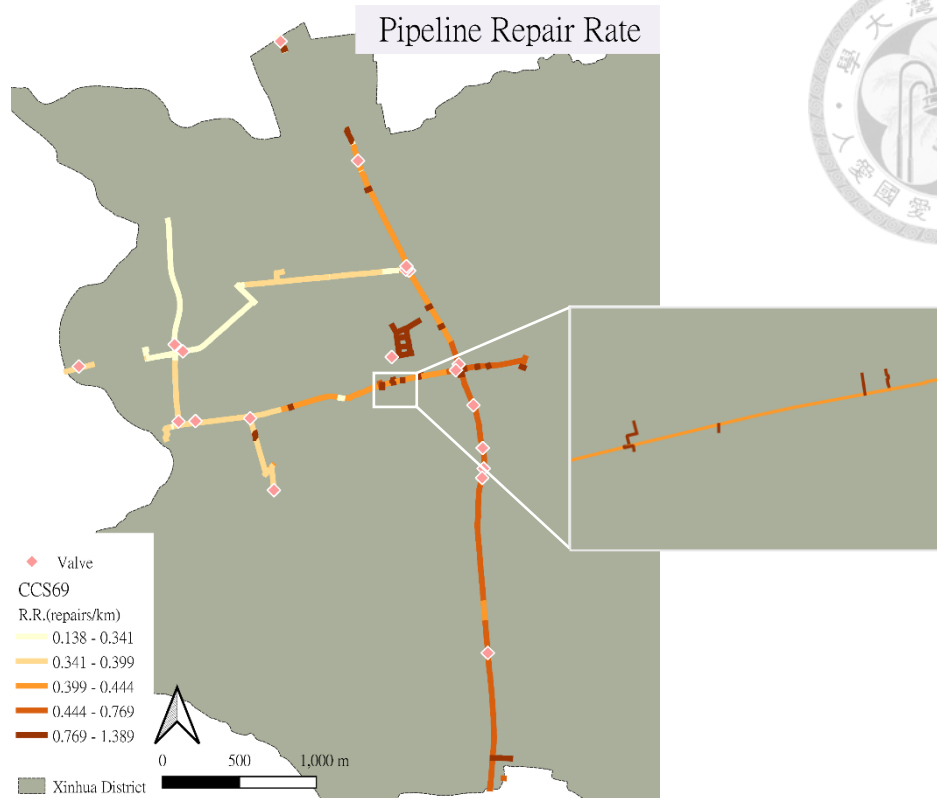


Figure 11 管線災損率(R.R.)

4.4.2 管線破壞機率

管線破壞機率由第三章研究法式(3-6)中管線災損率和柏松分布關係推得，於地圖上之分布如 Figure 12 在此地震情境下，管線破壞機率最高超過 20%，其大多為管長較長之非金屬管，顯示地震災害對於此類地下管線將帶來一定程度之影響。

由於管線破壞機率可經由柏松分布推得，其與管線長度有關，本研究首先根據管線資料中之管線編號進行區分，同一管線在行經不同街廓時將會被分割而呈現不同災損率與破壞機率。在管線災損率相同的情況下(管徑管材相同、經過同一街廓)，管線長度越長則該段管線之破壞機率越高。反之亦有管線災損率高但因管長短而使得依照柏松分布換算後之管線破壞機率仍低，因此 Figure 12 管線破壞機率(P_f)中管線破壞機率於地圖上的分布顯得不連續，有別於管線災損率和地震參數分

布相近之分布情況。

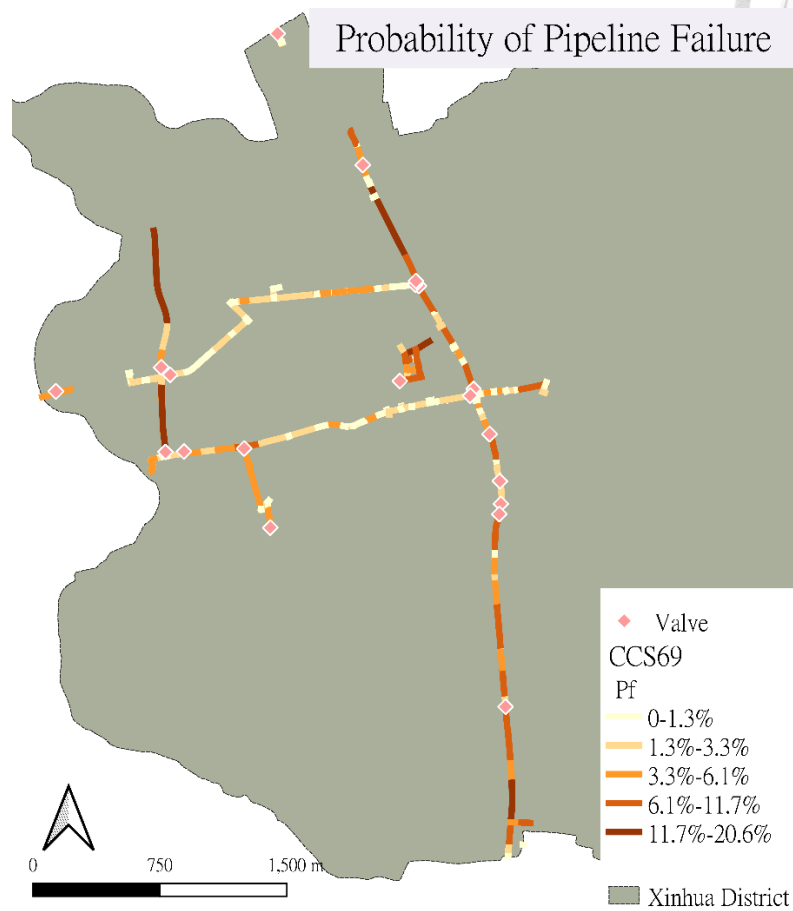


Figure 12 管線破壞機率(P_f)

4.5 系統供氣能力

4.5.1 蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)

本研究以蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)生成管線破壞個數 N_f 作為隨機變數，嘗試調整模擬次數 N 後，當 $N > 5000$ 後生成 N_f 之平均與變異數將逐漸收斂，至 $N = 10000$ 左右時變異數差異已小於 0.1，故本研究取 $N = 10000$ 進行(Figure 13)。

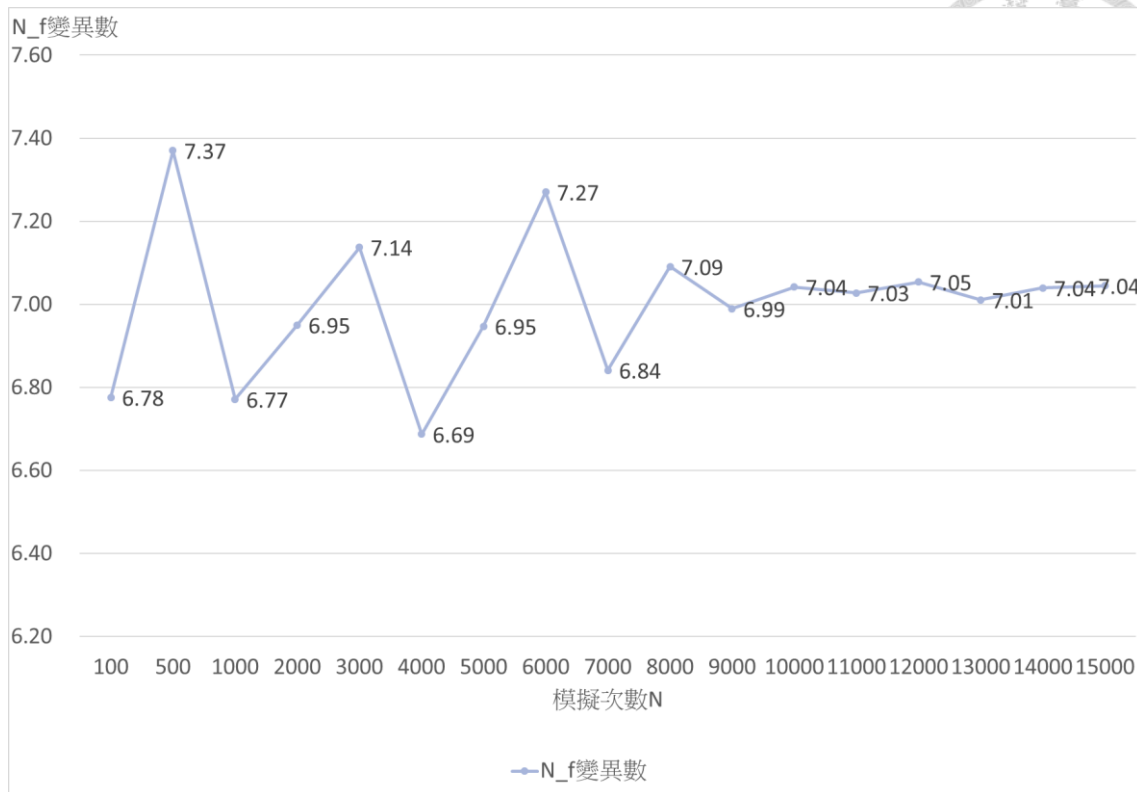


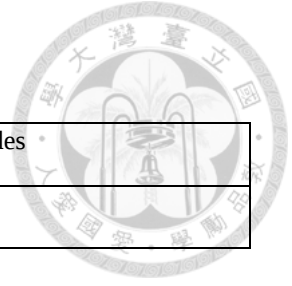
Figure 13 N_f 變異數收斂情形

由於以管線編號作為管線分界之標準，一條管線可能行經不同街廓地震參數圖層區域而被分割實際匯出疊圖分析結果時，分割之管線各自算出其災損率後，配合分割後的長度得到估計修復數 λ (Repairs)，統計同一管線編號之估計修復數加總作為 MATLAB 軟體生成隨機破壞之參數。

如同研究方法 3.6.1 所提及，天然氣管線受到地震災害受損後，需關閉對應開關閥待搶修後恢復供氣，而關閉開關閥會使受影響之用戶需求端範圍增加，本研究統計了模擬災害發生當下之管線災損和整體網絡供氣能力，在此地震情境下，平均約有 7 處管線受損以及 35 個用戶需求端受到影響，如 Table 7 所示。

Table 7 平均災損與受影響用戶需求端數量

Ave. Repairs	Ave. Impacted Demand Nodes
7.0668 (215 pipelines in total)	35.2552 (56 in total)



4.5.2 高風險之用戶需求端及開關閥

模擬管線破壞後，需關閉對應之開關閥，用戶需求端也因此受到影響，根據蒙特卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)後可統計各開關閥關閉及用戶需求端受影響之機率，以下列出在本研究案例分析之地震情境下，關閉及受影響機率前五高的開關閥與用戶需求端(Table 8)，並在地圖上呈現其位置(Figure 14)，大部分容易受影響之用戶需求端位於整體管線網絡下游，因為大多數上游之管線一旦受損，其供氣便會受到影響；開關閥關閉機率則取決於對應之管線數量及其管線災損率，整體網絡其他開關閥與用戶需求端之機率收於附錄。

Table 8 高風險開關閥與用戶需求端機率

Valve Rank	Closure Probability	Demand Node Rank	Impacted Probability
1	0.6241	1	0.9842
2	0.6168	2	0.9816
3	0.5274	3	0.9816
4	0.5164	4	0.9816
5	0.4730	5	0.9657

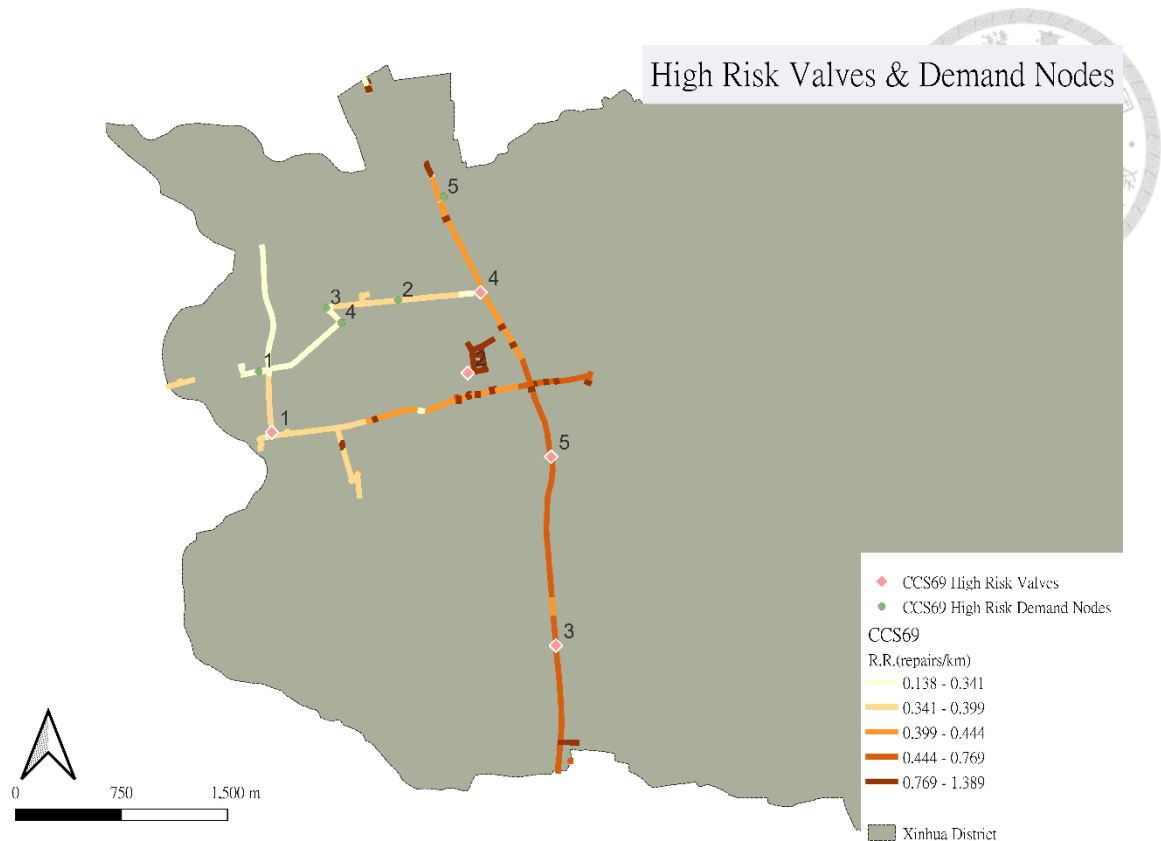


Figure 14 高風險之開關閥與用戶需求端

4.5.3 最快恢復供氣策略

整體網絡管線根據上下游對應關係整理後，可以得到最快恢復供氣策略之排序，修復所需時間亦如研究方法 3.5.4 所參照，將模擬中受損之管線依此修復可以得到最快恢復供氣策略復原曲線，由於整體供氣能力提升乃因開關閥開啟恢復供氣，因此復原曲線將在此刻跳躍上升，以其中一次模擬結果為例(Figure 15)，震災模擬結果共有 9 條管線受損需要維修、6 處開關閥需關閉，將受損管線依照上下游關係依序修復後可以得到整體最快恢復供氣策略之供氣能力復原曲線。由每次模擬曲線在各時間點之平均值可以得到天然氣網絡在此地震情境下平均的復原過程，如 Figure 16。調整模擬次數 N 後可以發現復原曲線之平均值相近，且正負一個標準差範圍也逐漸收斂固定(Figure 17)。

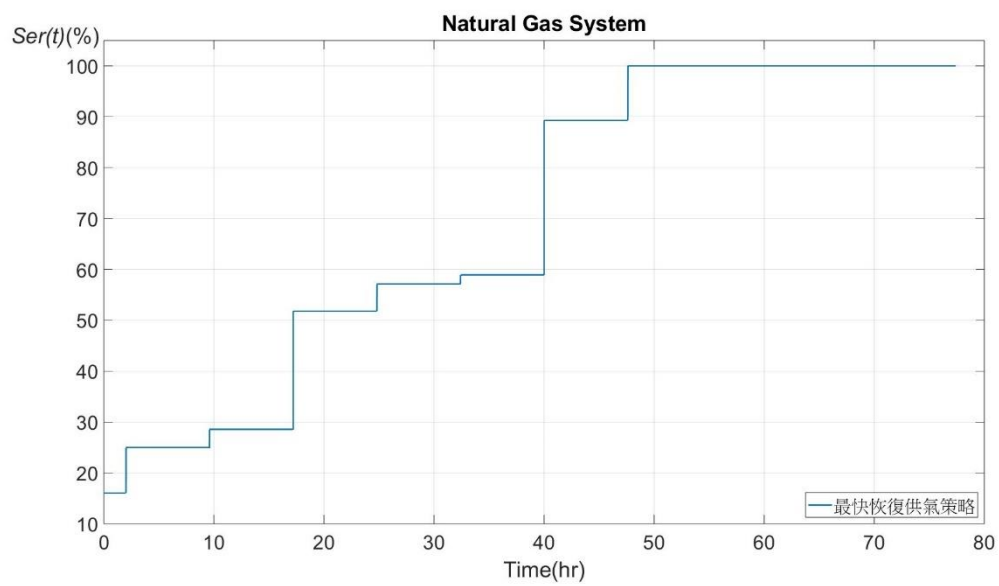


Figure 15 單一次模擬供氣能力復原曲線

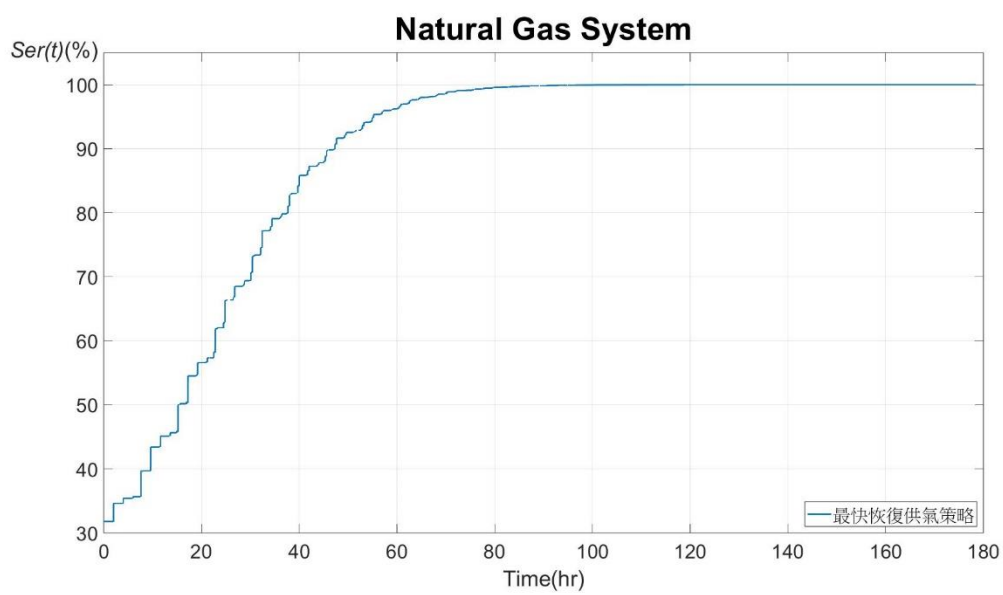


Figure 16 最快恢復供氣策略復原曲線

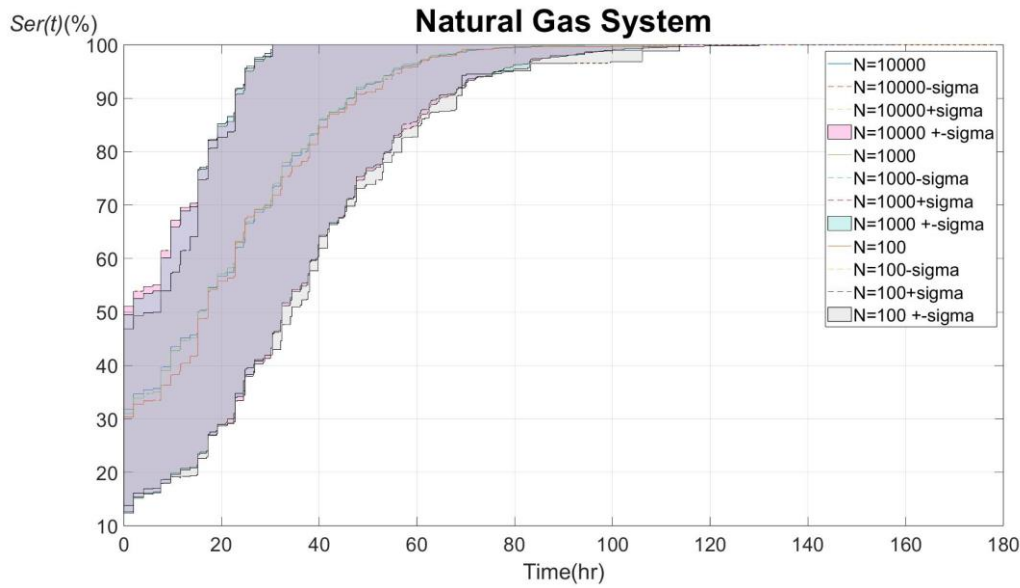


Figure 17 不同模擬次數 N 與供氣能力復原曲線標準差

4.6 天然氣網絡相依性評估與風險

4.6.1 天然氣網絡相依性評估—緊急避難之交通需求影響

在地震災害發生後，管線所在之道路需提供緊急避難之交通功能，疏散緊急避難之群眾，緊急避難需求之量值取決於管線所經過之街廓，而管線所在道路能夠提供之疏散能力則以車道數衡量，如研究方法 3.7 小節所提及 Tfc_{De} 之指標。無論管線是否因地震而損壞，其所在道路皆需提供緊急避難交通之功能，唯在管線破壞時將以 Tfc_{De} 指標作為維修管線排序之依據和參考，盡可能降低對於緊急避難之影響，Figure 18 緊急避難人口密度與管線所在道路緊急避難交通影響為緊急避難人口密度與各管線 Tfc_{De} 指標分布。

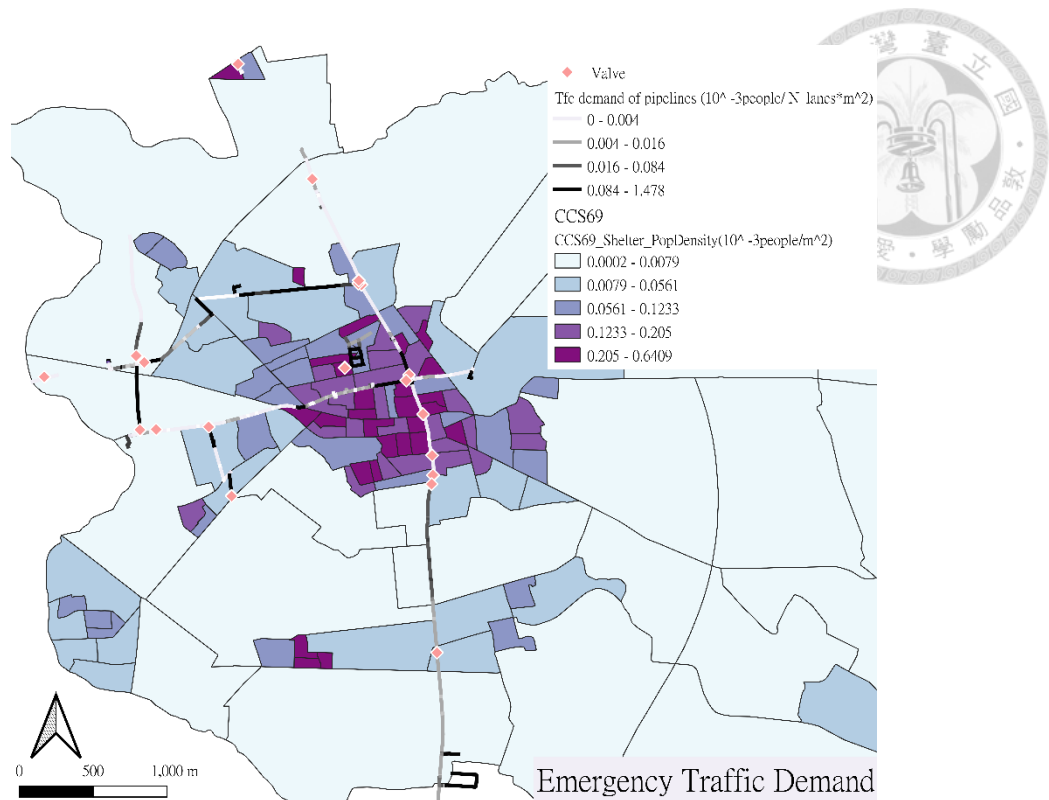


Figure 18 緊急避難人口密度與管線所在道路緊急避難交通影響

4.6.2 天然氣網絡相依性評估—惡化震後火災

關於惡化震後火災之風險與脆弱度指標，本研究先將其各項參數作整理並以分層設色圖呈現各項因子於地圖上之分布。Figure 14 和 Figure 20 分別為人口密度 (D_i) 與震後火災起火數 ($N_{ig,i}$) 之分布情形，由 TELES 軟體輸出；Figure 21 為管線佔比 ($R_{p,i}$)，由管線 GIS 圖資以及 TELES 街廓圖層運算得出。

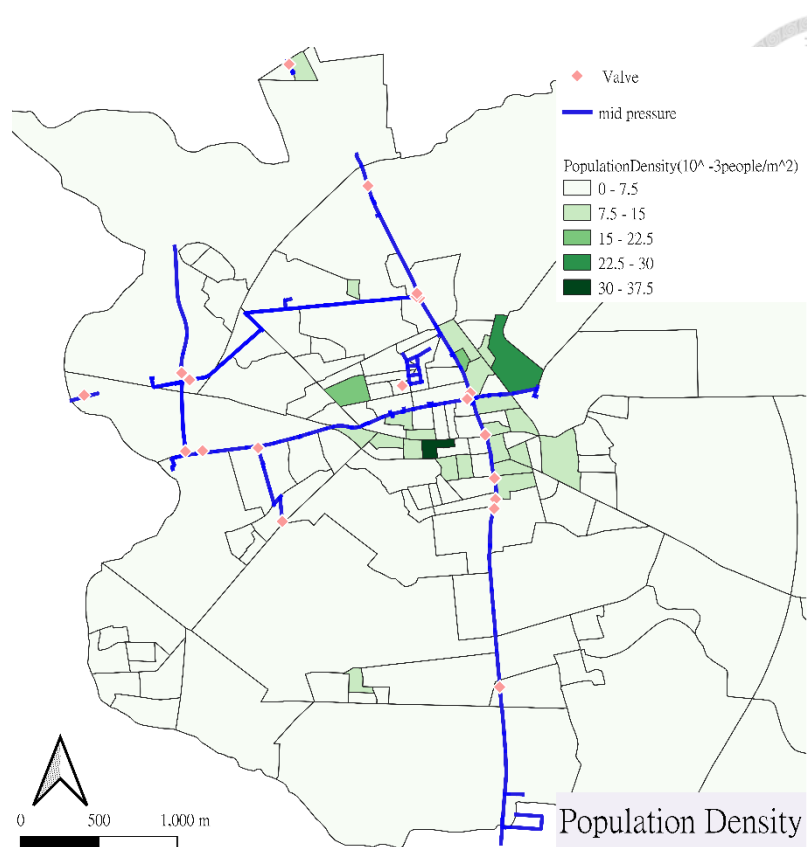


Figure 19 人口密度分布圖

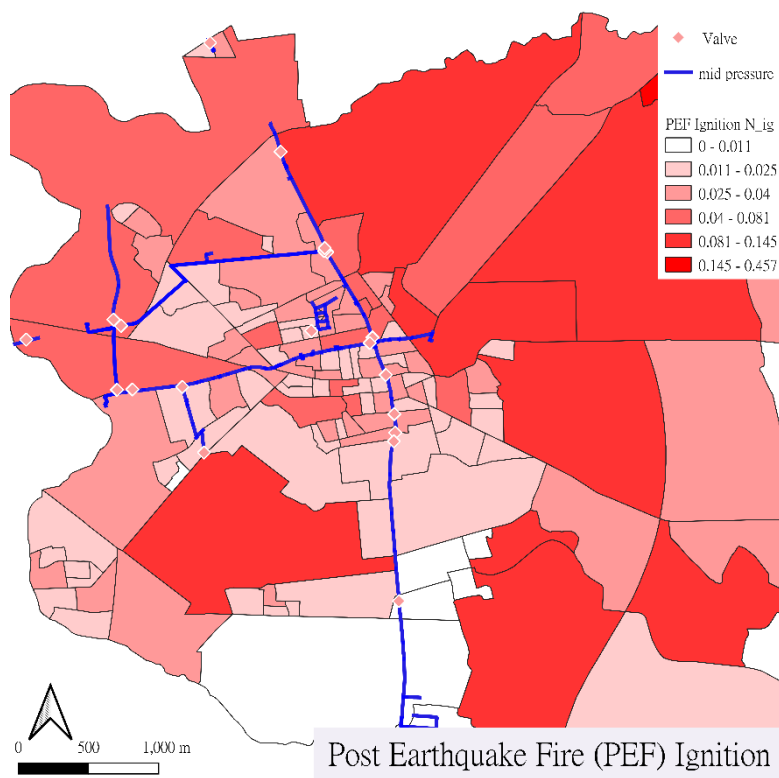


Figure 20 估計震後火災起火數分布圖

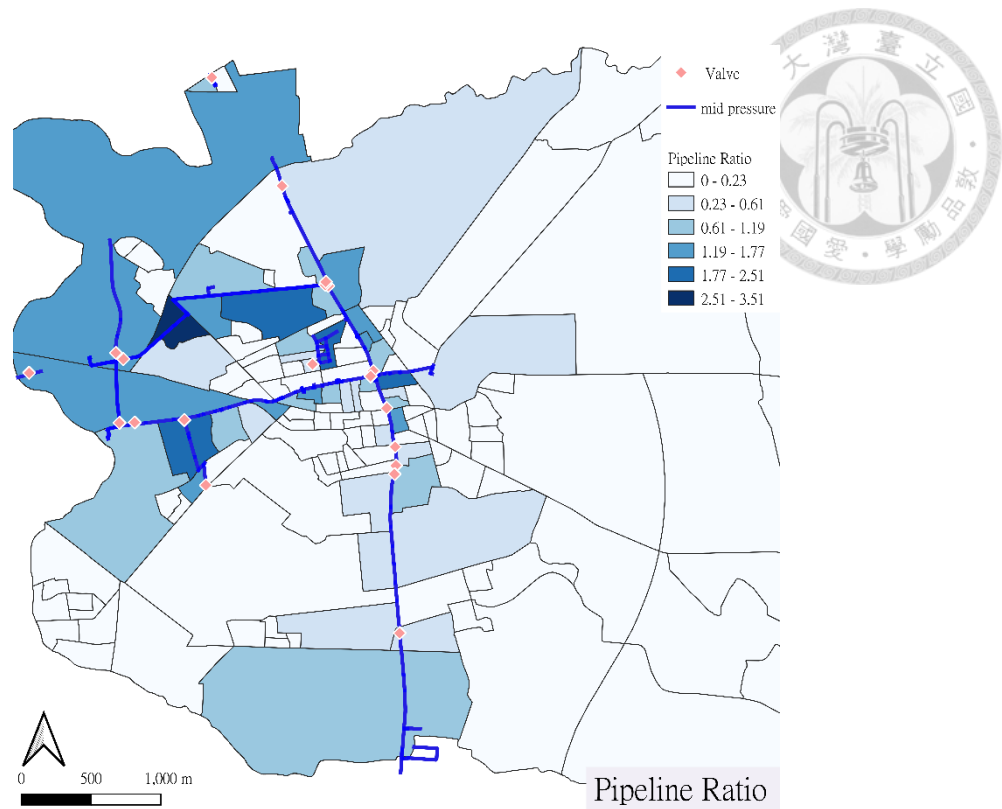


Figure 21 管線佔比分布圖

綜合以上參數得到惡化震後火災因子(I_w)並配合管線破壞機率(P_f)，根據研究方法 3.8.1 之式(3-9)，可以得到每條管線在此案例分析中的惡化震後火災風險(R_{PEF})，可於災前事先針對高風險管線預防，如 Figure 22 所示。

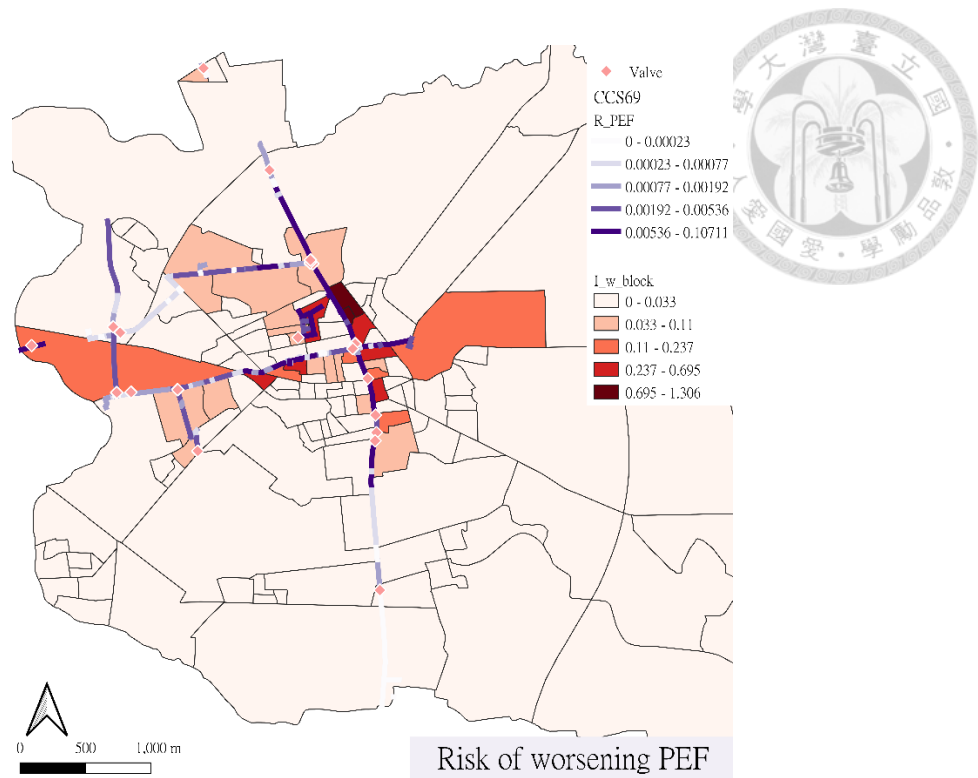


Figure 22 管線惡化震後火災風險

考量不同修復管線之排序策略對於整體供氣能力之回復亦有不同程度之影響，

Figure 23 供氣能力 $Ser(t)$ 復原曲線顯示各種復原策略下整體天然氣網絡供氣能力回復情形，最快恢復供氣策略如同其目的最快提升網絡供氣能力，其次為考量緊急避難交通影響策略，最後為降低惡化震後火災策略。

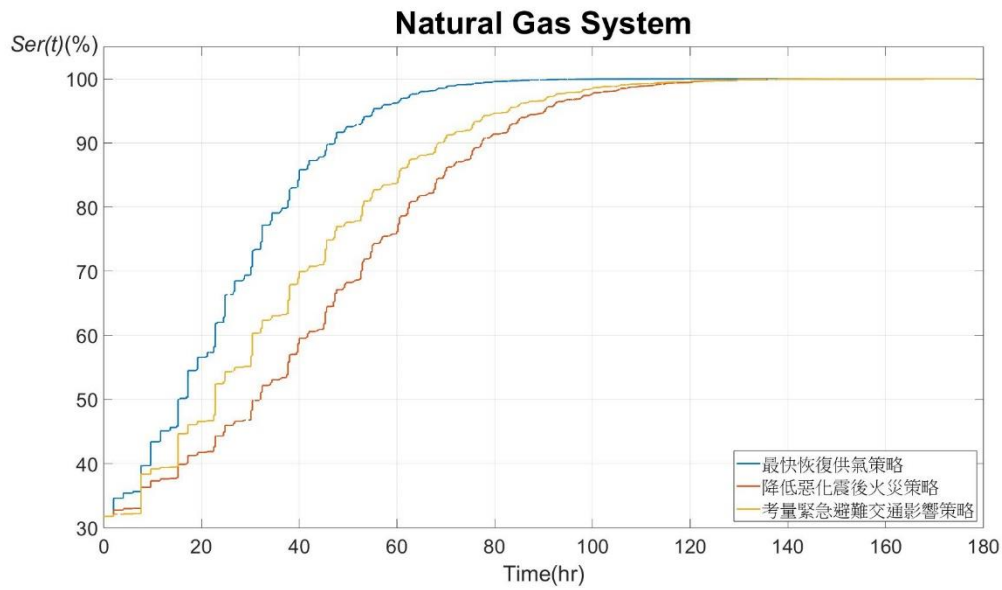


Figure 23 供氣能力 $Ser(t)$ 復原曲線

在模擬管線復原過程時，整體震後火災脆弱度指標 $I_{PEF}(t)$ 也會隨管線修復而降低，Figure 24 為 $I_{PEF}(t)$ 隨修復進程之變化，並和依照其他修復策略之修復排序一同比較，除了以降低惡化震後火災策略最快速降低 $I_{PEF}(t)$ 之外，最快恢復供氣策略相比考量緊急避難交通影響策略在降低惡化震後火災方面表現較佳。

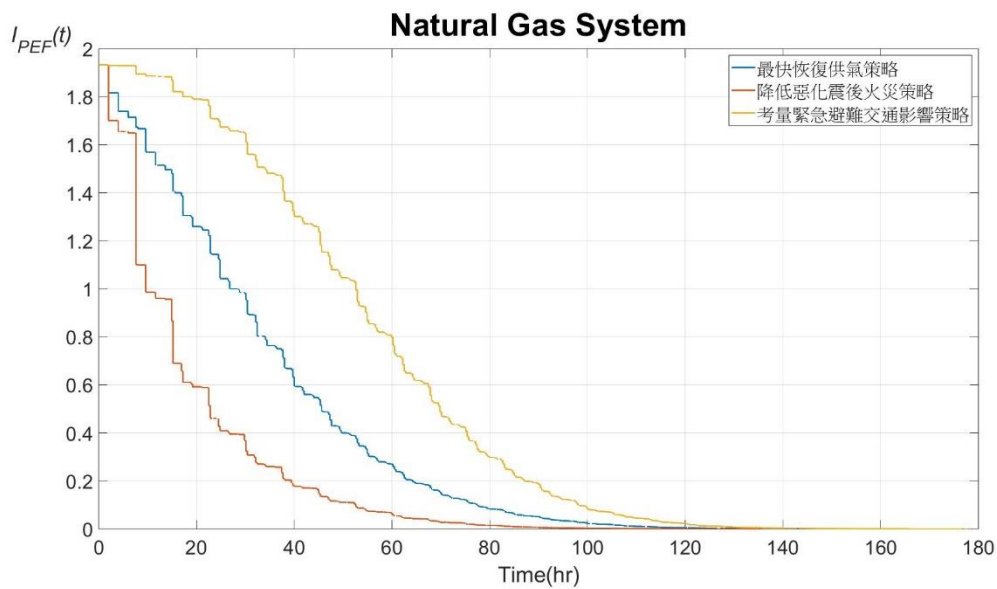


Figure 24 整體震後火災脆弱度指標 $I_{PEF}(t)$ 復原曲線

4.7 整體復原韌性

將以上各指標皆納入考量後，根據式(3-15)以整體韌性指標 $Q(t)$ 為座標縱軸，以衡量整體網絡綜合恢復表現(Figure 25)，比較各修復策略之情形，可以提供決策者根據不同目標、階段、搶修條件下制定整體網絡之復原模式。不同復原策略皆會使各項指標逐漸回復至災前水平，惟針對回復目的指標不同，因此在相同的模擬災損結果中會以不同管線修復順序進行復原，並呈現對應之復原曲線。在本研究之案例分析情形下，不同復原策略在整體綜合韌性指標 $Q(t)$ 下之差距因素仍為供氣能力之量值，在復原初期，由於本研究以逐處修復為原則，對於緊急避難交通之影響較不顯著，若同時有多處管線維修則將使整體韌性受到更多影響。就本研究之情境與條件，各復原策略對於整體韌性之表現，以最快恢復供氣策略復原表現最佳，其次為考量緊急避難交通影響，最後則是降低惡化震後火災。

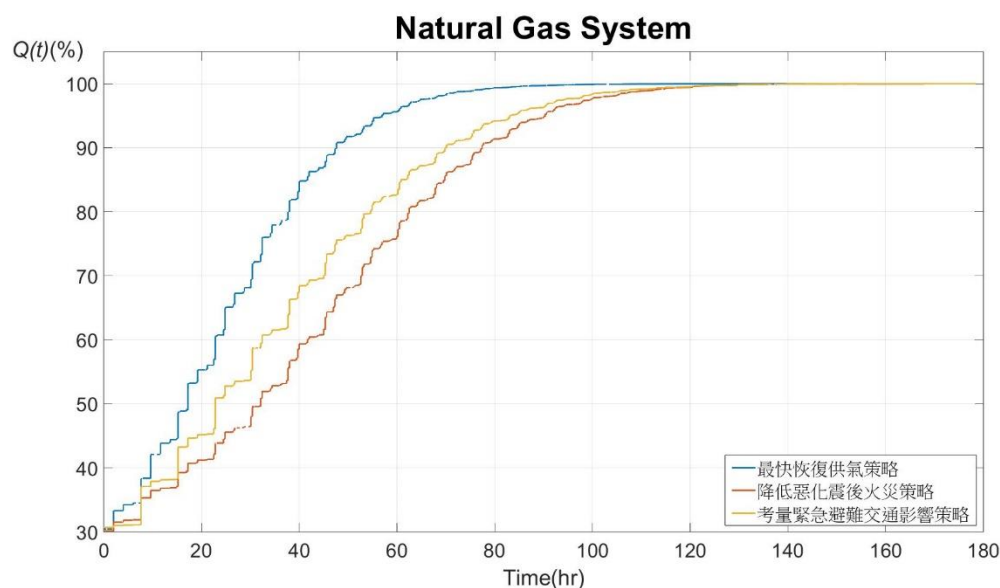


Figure 25 綜合韌性指標 $Q(t)$ 復原曲線

4.8 小結

從案例分析中將實際地震參數代入研究方法進行分析，得到天然氣管線網絡

可能之災損與回復情況，於災前呈現管線造成惡化震後火災之潛在風險，並訂定不同指標衡量調整管線修復順序帶來復原過程之差異，以多方面因素之影響呈現災損及其復原之表現。未來可將其他情境條件或區域套用此研究架構，或再加入其他韌性相關資料為參數及指標。以此提供其他相關研究或案例分析之參考，朝更完整與實際之評估分析方向持續進步。

Chapter 5 結論與未來建議



5.1 結論

本研究提出了系統韌性分析之架構，分為主題系統、環境與災害，並將其應用於天然氣管線網絡之震災模擬，以管線災損率(Repair Rate, *R.R.*)和蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)並配合網絡中管線與開關閥和用戶需求端之上下游對應關係進行，研究方法提供了災前之風險預估以及呈現災後復原過程情況，在災害管理中提供決策者做為參考，對於管線網絡未來規劃也有所幫助。

本研究以地震作為考量之災害背景、天然氣網絡作為主題系統、環境部分加入社區與其他系統資料並以緊急避難交通影響與惡化震後火災做為相依性之考量，更完整地分析整體韌性之表現。在案例分析中提供了數據結果並將其與各韌性因子以視覺化方式呈現，讓分析評估結果更容易理解。根據案例分析之結果，以下為本研究之結論：

1. 地震造成部分天然氣管線破壞並影響整體供氣能力：

在本研究案例分析之地震情境下，管線破壞機率最高超過 20%，顯示地震災害對於此類地下管線本身可能帶來一定程度之影響，模擬災損結果平均也有約 7 條管線會因地震災害而破壞，且由於天然氣管線相較於電力和自來水網絡管線分布較線性、成樹枝狀，較無額外冗餘供給，一旦管線受損則影響將可能擴及很大範圍。

2. 上游管線之耐震能力對整體供氣能力至關重要：

同上一點所提及，天然氣之供給網絡較無額外冗餘，所處於網絡上游供氣管線若損壞將導致下游許多用戶需求端受到影響，以案例分析之模擬結

果，從災前準備方面可以加強上游管線之耐震能力，或是增加供給來源以提升冗餘，避免其損壞後造成大範圍用戶受到影響；災後緊急應變及復原階段則可以參考不同策略以盡可能降低地震災害之衝擊。

3. 考量相依性之整體韌性指標反映更多災害帶來之影響：

除了考量天然氣網絡系統本身之供氣能力以外，綜合韌性指標 $Q(t)$ 將惡化震後火災及對於緊急避難之交通影響之量化數值一併計算，使復原曲線更全面地反映災害帶來的衝擊，不僅限於天然氣網絡本身。

4. 實際即時資料可得到更精確之分析成果：

本研究有保留因應更完整、及時資料之相容性，若有實際資料則可以用相同研究架構與方法根據實際條件與資料(網絡用戶分布情形、惡化震後火災因子、同時搶修破壞處)進行分析，得到最貼近現實之分析結果。

5.2 研究限制與未來建議

本研究統整過往文獻及研究後提出韌性分析資料來源之架構與整合天然氣管線網絡震災模擬方法，並以臺南市新化區做為案例分析之研究區域得到天然氣網絡震災模擬和韌性復原結果，目前本研究範圍與前提假設有所限制：

1. 管線範圍限定於貼近用戶需求端之中低壓管線
2. 開關閥皆能夠正常運作、管線損壞後即關閉對應開關閥
3. 修復過程逐處搶修

本研究案例分析之數據皆以過去研究與開放資料為主，未來若有更新，或是實際緊急應變時有即時統計資料則更可確保分析結果之精確性。另外，根據研究方法與目前結果可以繼續延伸或推動未來其他研究，以下對於本研究之內容提出未來建議：



1. 更多相依性指標作為韌性因子:

本研究以緊急避難交通影響和惡化震後火災作為天然氣網絡震災之相依性考量，未來研究可以加入更多的相依性元素，例如老年人口分布或中低收入戶等其他社會經濟資料，對於整體社群之屬性也加以考量，以更貼近現實社會生活中當災害發生時之情況評估分析。

2. 延伸至其他區域:

本研究以臺南市新化區做為案例分析之研究區域，其網絡規模與複雜程度中等，對於較複雜之管線網絡，需擁有上下游關係資料或者釐清管線、開關閥與用戶需求端之上下游關係後建立資料集，便能以相同研究方法進行韌性分析。

3. 其他地震情境與敏感度分析:

相同的管線網絡在不同地震情境下的災損情形也會有所差異，本研究之地震情境屬於較嚴重之事件(規模 6.9)，案例分析模擬在此災害情境下之災損情形以及系統韌性表現。不同的地震情境也可以討論不同的復原策略成效，未來研究亦可以針對不同災害程度制定不同的因應模式。另外，本研究著重模擬災害發生後對整體網絡系統造成之影響以及相依性與回復過程之考量，並未對各項參數和管線災損率或是整體供氣能力關係進行探討，後續研究可以將就此議題進行敏感度分析，得到各參數之變化對於管線災損率或是整體供氣能力的影響差異。

參考文獻



1. 白仁德, 地方社區水災、坡地災害回復力之評估與建構-子計畫:鄉鎮區層級坡地災害回復力之評估與建構(I). 2002.行政院國家科學委員會專題研究計畫 計畫編號,NSC101-2625-M004-001
2. Bruneau, M., S.E. Chang, R.T. Eguchi, G.C. Lee, T.D. O'Rourke, A.M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W.A. Wallace, and D. von Winterfeldt, A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, 2019. **19**(4): p. 733-752
3. 關鍵基礎設施災害脆弱度評估與風險管理：災害衝擊評估方法 1. 2011, 國家災害防救科技中心.NCDR 100-T33
4. 關鍵基礎設施災害脆弱度評估與風險管理：災害衝擊評估方法 2. 2013, 國家災害防救科技中心.NCDR 101-T14
5. 陳譽仁, 基於系統韌性最佳化之相依基礎設施災後修復作業, in 土木工程學研究所. 2019, 國立臺灣大學. p. 1-79
6. Albert, R., I. Albert, and G.L. Nakarado, Structural vulnerability of the North American power grid. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 2004. **69**(2 Pt 2): p. 025103
7. Golara, A. and A. Esmaily, Quantification and Enhancement of the Resilience of Infrastructure Networks. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2017. **8**(1)
8. Cagnan, R.D.Z., Restoration Modeling of Lifeline Systems. 2004
9. 鄧敏政、李維森、李中生, 我國地下管線 安全管理現況介紹. 2016, 土木水利 第四十三卷 第三期 p.39 - 46
10. 天然氣事業部業務簡介(110). 2021, 台灣中油股份有限公司
11. 天然氣事業部業務簡介(111). 2022, 台灣中油股份有限公司
12. 林茂文, 邁向非核家園與擴供天然氣之影響分析. 2018, 石油季刊 第 54 卷第 2 期
13. 110 年度國內液化石油氣市場分析. 2022, 經濟部能源局
14. 陳宏市, 液化天然氣輸送 工程—液化與氣化. 2011, 科學發展 465 期
15. 李皇章, 臺灣天然氣的現況與展望. 2019, 石油季刊 第 55 卷第 1 期
16. 周桂蘭, 運用系統動態模型評估臺灣液化天然氣安全存量風險. 2019, 臺灣礦業, 第 71 卷第 4 期, 第 1-15 頁
17. 台灣中油股份有公司. Available from: <https://www.cpc.com.tw/cp.aspx?n=3599>.
18. Walter W. Chen, B.-j.S., Yi-Chih Chen, Jui-Huang Hung, Howard H. Hwang, Seismic response of natural gas and water pipelines in the Ji-Ji earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002
19. 施邦築, 九二一集集地震 維生管線損害之後續調查與初步研究. 2000
20. 瓦斯協會 106 年度理監事赴日本福岡參訪出國報告. 2017
21. 李心平、蔡秀芝、廖苑辰、楊子濬、陳貞榮, 0206 美濃地震台南市政府災害應變與體系探討. 2017, 中華防災學刊 Vol.9 No.01
22. 0206 地震災情彙整與實地調查報告. 2016, 國家災害防救科技中心 國家地震工程研究中心
23. 0206 地震災害應變處置報告第 16 報. 2016, 中央災害應變中心

24. Gantes, C.J. and G. Bouckovalas, Seismic Verification of the High Pressure Natural Gas Pipeline Komotini–Alexandroupoulis–Kipi in Areas of Active Fault Crossings. *Structural Engineering International*, 2018. **23**(2): p. 204-208
25. 許智豪、鄧敏政, 災害衝擊下之維生系統功能評估方法. 2020, 中國土木工程學刊 第三十二卷 第二期
26. J. H. Williams, T.M.W., L. Wotherspoon, N. Horspool, R. Paulik, E. M. Lane, M.W. Hughes, TSUNAMI VULNERABILITY OF CRITICAL INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT OF FUNCTIONS FOR IMPACT ASSESSMENT. 2020
27. 李敏誠 Lee, M.-C., 地下管線受震之損害研究 Surveys on the Damage of Buried Pipeline After Earthquake, in 土木工程學研究所. 2008, 國立台灣大學
28. 吳佳容, 迅捷維生管線災損評估境況模擬系統之研究與實作 Implementation of Rapid Earthquake Loss Estimation and Scenario Simulation System of Lifelines, in 土木與防災研究所. 2004, 國立臺北科技大學
29. Farahani, S., A. Tahershamsi, and B. Behnam, Earthquake and post-earthquake vulnerability assessment of urban gas pipelines network. *Natural Hazards*, 2020. **101**(2): p. 327-347
30. Teng, M.-C. and S.-S. Ke, Disaster impact assessment of the underground hazardous materials pipeline. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021. **71**
31. Hou, G. and Q. Li, Firefighting capacity evaluation of water distribution system subjected to multi-ignitions of post-earthquake fires. *Structural Safety*, 2021. **88**
32. Mina, D., D. Forcellini, and H. Karampour, Analytical fragility curves for assessment of the seismic vulnerability of HP/HT unburied subsea pipelines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020. **137**
33. 公共給水原水導管地震風險評估技術之研究. 2017, 經濟部水利署
34. Hazus Earthquake Model Technical Manual. 2020, FEMA
35. 黃沛群, 地下維生管線地震損害評估 以虛擬管線為例, in 土木工程研究所. 2002, 國立中央大學
36. 葉錦勳、洪李陵、文慶霖, 瓦斯系統之耐震損害評估及其應用 Seismic Damage Assessment of Gas System and Its Applications. 2005, 國家地震工程研究中心.NCREE-05-021
37. De Risi, R., F. De Luca, O.-S. Kwon, and A. Sextos, Scenario-Based Seismic Risk Assessment for Buried Transmission Gas Pipelines at Regional Scale. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2018. **9**(4)
38. Omidvar, B. and H.K. Kivi, Multi-hazard failure probability analysis of gas pipelines for earthquake shaking, ground failure and fire following earthquake. *Natural Hazards*, 2016. **82**(1): p. 703-720
39. Hwang, H., Y.-H. Chiu, W.-Y. Chen, and B.-J. Shih, Analysis of Damage to Steel Gas Pipelines Caused by Ground Shaking Effects during the Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. *Earthquake Spectra*, 2019. **20**(4): p. 1095-1110
40. Golara, A., Probabilistic seismic hazard analysis of interconnected infrastructure: a case of Iranian high-pressure gas supply system. *Natural Hazards*, 2014. **73**(2): p. 567-577
41. Dell’Isola, M., G. Ficco, L. Lavallo, L. Moretti, A. Tofani, and F. Zuena, A resilience assessment simulation tool for distribution gas networks. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020. **84**
42. Cimellaro, G.P., A. De Stefano, and O. Villa, Serviceability of Natural Gas

- Distribution Networks after Earthquakes. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2013. **07**(02)
43. 洪泰昌, 天然氣管線震害災損量化推估與對策 The Quantitative Earthquake Loss Estimation and Mitigation Countermeasures for Gas Pipeline, in 土木與防災研究所. 2009, 國立臺北科技大學
44. Kröger, W., Critical infrastructures at risk: A need for a new conceptual approach and extended analytical tools. *Reliability Engineering & System Safety*, 2008. **93**(12): p. 1781-1787
45. Little, R.G., Controlling Cascading Failure: Understanding the Vulnerabilities of Interconnected Infrastructures. *Journal of Urban Technology*, 2010. **9**(1): p. 109-123
46. 黃俊能, 國家關鍵基礎設施防護(NCIP)脆弱度評估及相依性分析之研究. 2012
47. Korkali, M., J.G. Veneman, B.F. Tivnan, J.P. Bagrow, and P.D. Hines, Reducing Cascading Failure Risk by Increasing Infrastructure Network Interdependence. *Sci Rep*, 2017. **7**: p. 44499
48. Poljanšek, K., F. Bono, and E. Gutiérrez, Seismic risk assessment of interdependent critical infrastructure systems: The case of European gas and electricity networks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012. **41**(1): p. 61-79
49. 黃憲章, 震後火災救援能力探討研究-以台中市為例, in 土地管理學系碩士班. 2007, 逢甲大學
50. 洪祥瑗、文慶霖、柯明淳、劉季宇、葉錦勳, 自來水地下管線、輸電鐵塔 與震後火災之災損推估模式研究. 2007
51. 葉錦勳、劉季宇、洪祥瑗、黃李暉、范秋屏、陳志欣、陳世良、周寶卿、於積璿, 106 水利署公共給水原水導管地震風險評估技術之研究. 2017
52. 台灣地震損失評估系統(TELES)使用手冊. 2022
53. 政府資料開放平台. Available from: <https://data.gov.tw/dataset/130271>.
54. Wang, Y.-J., C.-H. Chan, Y.-T. Lee, K.-F. Ma, J.B.H. Shyu, R.-J. Rau, and C.-T. Cheng, Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2016. **27**(3)
55. 南部中洲構造規模 6.9 大規模地震消防救災方案. 2021, 內政部

附錄 Appendix



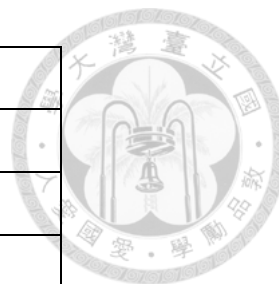
附錄一 開關閥關閉機率

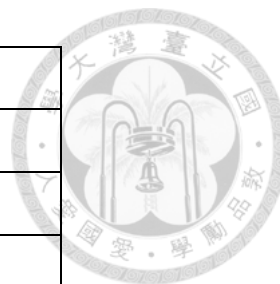
#Valve	關閉機率(%)
100000735	5.51
100000791	0.49
1381	62.41
1380	24.73
1376	31.84
1351	47.3
1343	6.94
1342	3.11
1340	0
1262	52.74
1206	31.31
1205	13.56
1204	0
1169	0.49
1405	61.68
1416	21.68
1415	5.77
1422	51.64
1424	0.48
1426	9.6

附錄二 用戶需求端受影響機率

#Demand Node	受影響機率(%)
41731429	62.41

61660053	87.68
160160216	62.41
179590002	91.82
75360212	62.41
41322403	87.76
41322402	87.76
170170213	96.03
170170217	77.46
40471353	62.41
70800873	96.57
1	29.39
2	37.29
3	20.56
4	62.41
5	62.59
6	70.7
7	70.7
8	70.7
9	72.42
10	62.41
11	62.41
12	62.41
13	62.41
14	62.41
15	62.41
16	62.41
17	77.46
18	36.97
19	36.97





20	91.82
21	91.82
22	91.82
23	91.82
24	94.29
25	94.29
26	94.29
27	94.29
28	96.03
29	96.03
30	96.57
31	5.51
32	5.51
33	5.51
34	5.51
35	5.51
36	0.48
37	98.16
38	15.07
39	98.16
40	15.07
41	98.16
42	98.42
43	61.68
44	61.68
45	61.68

*註:用戶需求端編號 1 至 45 為網絡管線末端自行假設之用戶，其餘用戶需求端及開關閥編號為開放資料圖資內容

