

# 定量風險分析技術於 重要設施地震衝擊評估之應用 —— 以水管橋為研究範例

柯孝勳／國家災害防救科技中心地震與人為災害組副研究員

施邦築／國立臺北科技大學土木工程系副教授

陳煒欽／國立臺北科技大學土木工程系碩士

李中生／國家災害防救科技中心地震與人為災害組副研究員

由於地震發生所具有突發性、高度不確定性及瞬間摧毀之特性，相較於其它天然災害具有更高之威脅性，故本研究目的擬結合定量風險分析技術（事件樹與故障樹）進行水管橋之耐震安全評估，以提升管理之有效性及可靠性。本研究以水管橋於震後是否喪失持續輸水功能為主要考量，透過事件樹之邏輯推演，列出地震後對水管橋所造成影響之可能事件，再以故障樹之邏輯演繹，由事件結果反推所有可能事件失敗之因素，並藉由失敗機率之推算，分析重要之風險因子。

而本研究中於定量風險分析之參數量化方法，主要分為二部分：

(1) 橋梁結構之損壞機率利用橋梁易損性分析進行探討 (2) 鋼材損壞機率以鋼材可靠度進行分析。

本研究以新店水管橋為例進行個案分析，所建立之定量風險分析模式可提供其他關鍵性基礎設施應用之參考。

## 前言

台灣位處於菲律賓板塊與歐亞板塊互相碰撞之處，故地震仍是威脅橋梁安全之主要災害之一，尤其水管橋為重要維生管線，地震中若產生災害而發生局部中斷，造成無法維持正常輸水，對社會、經濟等層面必定造成難以評估之損害。而目前國內水管橋安全性評估主要亦以耐震為主要考量。

臺北自來水處曾針對所業管之 4 座水管橋梁進行安全檢測及評估，採用之方法為 D.E.R.&U 目視檢測評估法，並配合中央橋梁維護管理系統，以 D.E.R.&U 及 ABCD 系統為架構外，並首先訂定優先評選項目及其權重，進行初步評估篩選對象。

而交通部頒布之「公路橋梁耐震設計規範」中說明橋梁之耐震能力分析係依據橋梁現場檢測資料、實際尺寸、配筋及材料強度，配合橋梁結構耐震分析，決定橋梁發生各種破壞模式相對應之地震地表加速度。

而近年來，相關研究以風險推估結構物之強度與壽命，以增加評估之可靠性，如橋梁耐震易損性曲線分析，地震造成橋梁結構系統損害之致災因子大致分為地表震動和土層破壞兩類，其中地表震動強度以地表最大加速度（PGA）表示，土層破壞程度則以地震引致之永久位移量（PGD）表示。

而定量風險分析方法中，事件樹是一種次序邏輯之事故分析法，可為時序或順序邏輯，而故障樹分析

技術是由各失敗事件結果反推所有可能發生之原因，並可藉由統計基本原因之故障率資料推算事件發生之機率。本研究擬應用定量風險分析之技術於橋梁耐震安全評估，配合事件樹（Event Tree）與故障樹（Fault Tree）之風險分析技術，並藉由統計基本因子之故障率資料推算事件發生之頻率，計算出事件損壞之機率，據以了解水管橋受震後之損害風險。

## 定量風險分析應用於水管橋

於本研究之定量風險分析中，分別以故障樹分析與事件樹分析作為事件之分析法：

- 故障樹分析法（Fault-Tree Analysis, FTA）：係利用邏輯演繹法，由事件之後果反推發生之所有可能之基本原因，並可藉由統計基本原因之故障率資料推算事件發生之頻率。故障樹技術經過波音航空公司加以實行，逐漸被廣泛應用於如核能發電廠、化學工業等領域，以防止重大災害之發生。
- 事件樹分析法（Event-Tree Analysis, ETA）：係利用邏輯歸納法，透過時序或次序邏輯進行事故分析之技術。本方法以一個初始事件為起點，按照事故發展的順序分成各階段分析，而每一事件之後續事件只能取完全對立的兩種狀態之一為原則（即發生或不發生兩種狀態），逐步向結果發展，直到系統故障或事故發生為止。

本研究採用之方法係利用事件樹與故障樹之定量風險分析工具及橋梁易損性曲線分析技術，針對水管橋在地震後之可能受損風險進行分析。而事件樹之建立分為橋梁與水管兩大部分，以水管之破壞而造成輸水之功能喪失為前提，對水管造成直接破壞或間接破壞之可能事件進行分析。

## 橋梁耐震風險評估模式與新店水管橋介紹

首先於事件樹之建立，包含地震發生，經過「土壤是否液化」、「橋梁是否破壞」、「錨定是否破壞」至「水管是否損壞」等事件，來計算其情境之發生機率。並透過故障樹分析技術，針對事件樹之各失敗事件結果推演可能發生之原因。本研究並使用 FaultTree + V11.20 分析程式，藉由故障樹中之各基本故障事件失效量化參數，計算出各失敗事件之失效機率及事件樹中各情境發生機率，再據以分析相關結果。

本研究以北部地區一處水管橋為個案研究對象，進行耐震安全之定量風險評估。該水管橋為清水輸水幹管之水管橋，結構形式為一鋼拱橋，橋長達 290 m，上部結構為 3 跨之鋼拱，鋼拱每跨跨距約 70 m，拱高約有 10.6 m，以 11 根連桿支撐輸水幹管；下部結構為單柱鋼筋混凝土橋墩與樁式基礎，橋墩高度約 12 m；輸水幹管為內徑 2,400 mm、管厚 20 mm 之鋼管。水管橋之構造參見圖 1。



圖 1 水管橋構造

### 事件樹與故障樹之建立

本研究進行定量風險分析時，最主要之方法為事件樹之建立與故障樹之建立，找出可能之失敗事件與造成該事件之原因，再配合參數量化方法計算出各事件之失敗機率，以針對破壞機率高之事件作維護。

事件樹之建立，係由地震發生之開始至輸水功能喪失，推演事件之發生至結束，從地表之土壤液化經過橋梁破壞、錨定破壞再傳向水管落橋與水管損壞，故事件樹之建立係於水管輸水功能是否喪失為考量下，參考國內、外地震造成基礎設施破壞、土壤液化以及維生管線各類災損情形為參考，針對水管與橋梁作出彼此影響之判斷，擬定「土壤是否破壞」、「橋梁是否破壞」、「錨定是否破壞」、「水管是否損壞」之可能失敗事件，本研究建立之事件樹如圖 2 所示。

事件樹建立後，再針對各失敗事件進行可能肇因之探討，建立其故障樹。本研究故障樹分析由「本體損壞」與「受外力破壞」二個部分因素進行研析，而由一個基本故障事件或者多個基本故障事件共同造成該失敗事件之發生。

各故障樹建構之考量與，參考橋梁與管線破壞之相關研究分析如下：

1. 於水管橋之橋梁破壞部分，因本文探討之水管橋有別於一般之橋梁，於橋台、橋墩之上方為水管，而非主梁與橋面板，且於水管上方亦有鋼拱梁抵抗彎矩，故橋梁破壞所考慮之範圍分別為地面下之基礎、地面上之結構體（上結構與下結構）之部分：

(1) 基礎破壞方面，基礎沉陷以土壤液化與地表錯動為主，基礎位移以土壤側向滑動及傾斜為主。

(2) 結構體破壞方面，分為上部結構破壞及下部結構破壞二部分：

A. 上部結構破壞，以鋼拱梁破壞與落橋為考量，而鋼拱梁破壞又分為鋼拱梁變形量過大及外力破壞：鋼拱梁變形量過大有位移、傾斜、變形，外力破壞有撓曲破壞、撓剪破壞、剪力破壞、撓剪破壞等因素。

B. 下部結構破壞，以橋台破壞及橋墩破壞為考量：

- a. 橋台破壞有地表錯動、回填土不確實、土壤液化。
- b. 橋墩破壞分為橋墩變形量過大及外力破壞，橋墩變形量過大有位移、傾斜、變形；外力破壞有撓曲破壞、剪力破壞、撓剪破壞。

橋梁破壞之故障樹分析如圖 3 所示。

2. 在水管橋之錨定破壞部分，錨定為橋梁之接合處、橋梁之固定端及橋梁之表面維護，分別為 U 型鋼環破壞、螺栓破壞及塗膜劣化三部分：

(1) U 型鋼環破壞方面，本體缺陷主要以銹蝕為考量，而外力破壞為剪力破壞與變形過大所致。

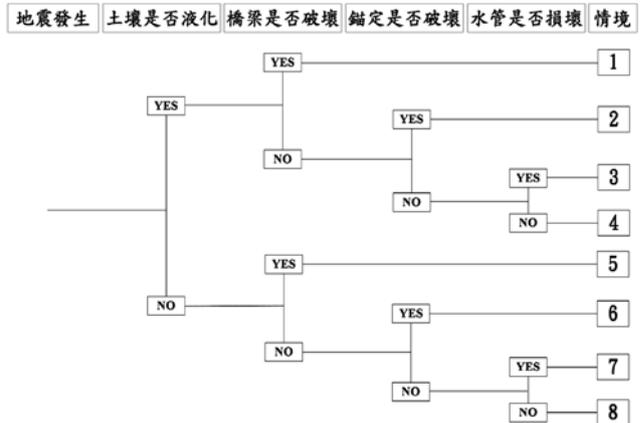


圖 2 水管橋之事件樹分析

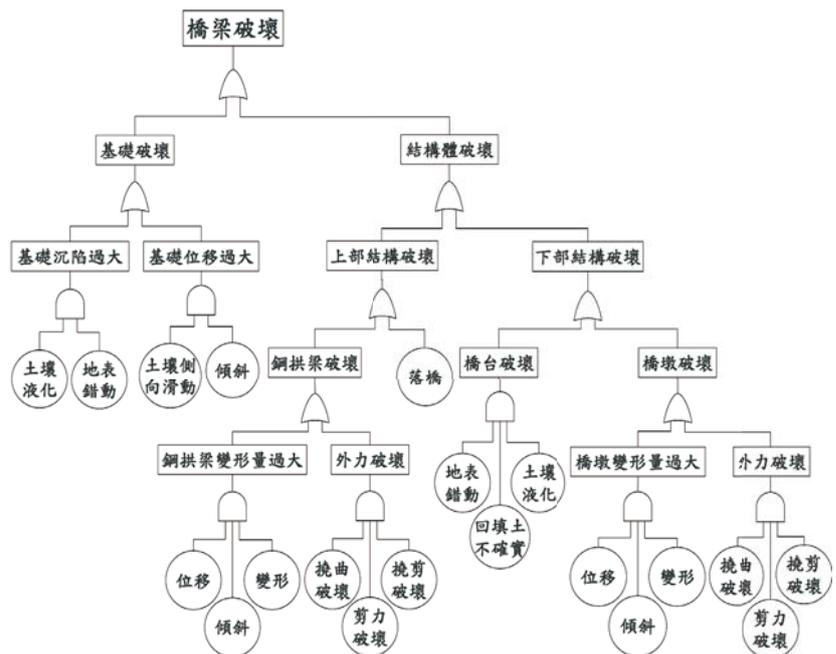


圖 3 橋梁破壞之故障樹分析

- (2) 螺栓破壞方面，螺栓缺陷以本體之材質不良為考量，如銹蝕、溫差、老化、偷工減料等。而外力破壞為剪力破壞與拉拔破壞所致。
- (3) 塗膜劣化方面，錨定材料通常曝露於陽光下，再加上風吹雨淋，故塗膜表面難免都有劣化情況，如剝離、浮腫、龜裂、變褪色、生銹。錨定破壞之故障樹分析如圖 4 所示。

3. 水管橋之水管損壞部分，以水管之破壞而造成輸水之功能喪失為前提，分別進行接頭破壞、管體破壞及附件破壞三部分之分析：

- (1) 接頭破壞方面，接頭缺陷主要為本體之材質不良問題，而外力破壞主要為張力破壞、承壓破壞、水壓破壞、撓曲破壞所致。
- (2) 管體破壞方面，管體缺陷主要為本體之材質缺陷問題，如管壁開裂、溫差、硬化、偷工減料。外力破壞主要為龜裂破壞、變形彎折、斷裂、水壓破壞所致。

- (3) 附件破壞方面，主要考量為水管周邊設施對水管造成破壞之影響情況，如管線固定設備破壞、人孔破壞龜裂及錨定螺栓鬆脫。

### 參數量化方法

於本研究之故障樹中各基本故障事件發生機率之參數量化方法，主要分為橋梁結構之損壞機率參數與材料損壞機率參數量化二部分：

#### 橋梁結構之損壞機率以橋梁易損性進行分析

台灣世曦工程顧問股份有限公司之「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性」研究報告中，已針對省道公路橋梁之各典型橋梁分類中挑選出 148 座具代表性之橋梁進行耐震詳細評估，並作成耐震易損性分析完整性報告。該報告依其分析結果並參考 TELES 橋梁之分類類型，提供各類型橋梁易損性曲線參數（中值與標準差）之平均值與修正方式，包括最大地表加速度耐震易損性曲線與位移耐震易損性曲線，可方便建立橋梁之易損性曲線。本研究依其方法建立最大地表加速度（PGA）易損性曲線圖及位移易損性曲線圖，並以 PGA 為 1 g 與地表永久位移 0.2 m 計算損害機率，相關考量如下：

- (1) 藉由集集大地震最大地表加速度作為極端地震事件發生之地表震度強度，其損害機率分別為輕微損壞之機率為 0.907、中度損壞之機率為 0.699、嚴重損壞之機率為 0.313 和完全損壞之機率為 0.073。
- (2) 依據「臺北區地下自來水管線地震危害度之研究」對於震後地下管線災損率之分析，取 0.2 m 作為可能發生之境況，其損害機率分別為輕微損壞之機率為 0.971、中度損壞之機率為 0.790、嚴重損壞之機率為 0.391 和完全損壞之機率為 0.087。

#### 鋼材損壞機率以鋼材可靠度進行分析

本研究考量水管橋鋼材之 4 個使用階段之材料可靠度，分別為正規化使用時間（已使用時間／平均使用年限）為 0.25、0.50、0.75 及 1.00 之 4 個階段，材料可靠度隨時間退化之情形如參見圖 6 所示。而依其圖，此 4 階段之材料可靠度分別為 0.915、0.728、0.542 與 0.400，亦即失效率分別為 0.085、0.272、0.458 與 0.600。

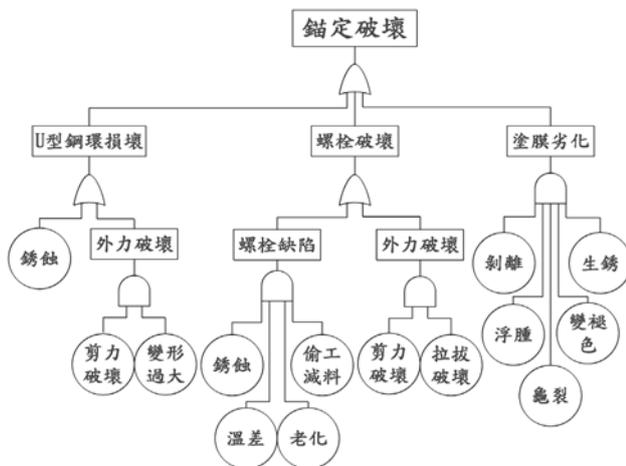


圖 4 錨定破壞之故障樹分析

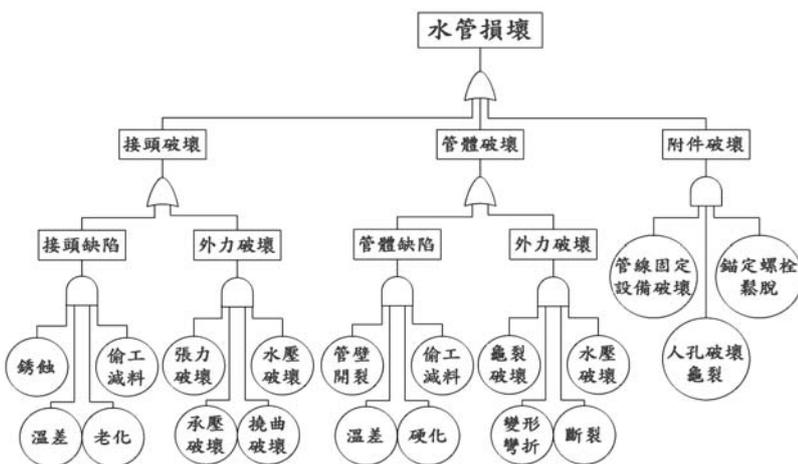


圖 5 水管損壞之故障樹分析

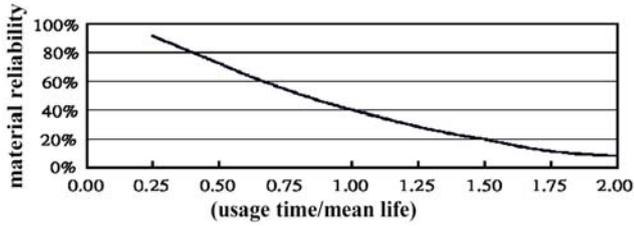


圖 6 鋼材可靠度圖

### 水管橋定量風險評估之分析結果

本研究使用 FaultTree + V11.20 分析軟體進行事件樹與故障樹計算，分析結果如圖 7 與圖 8 所示。

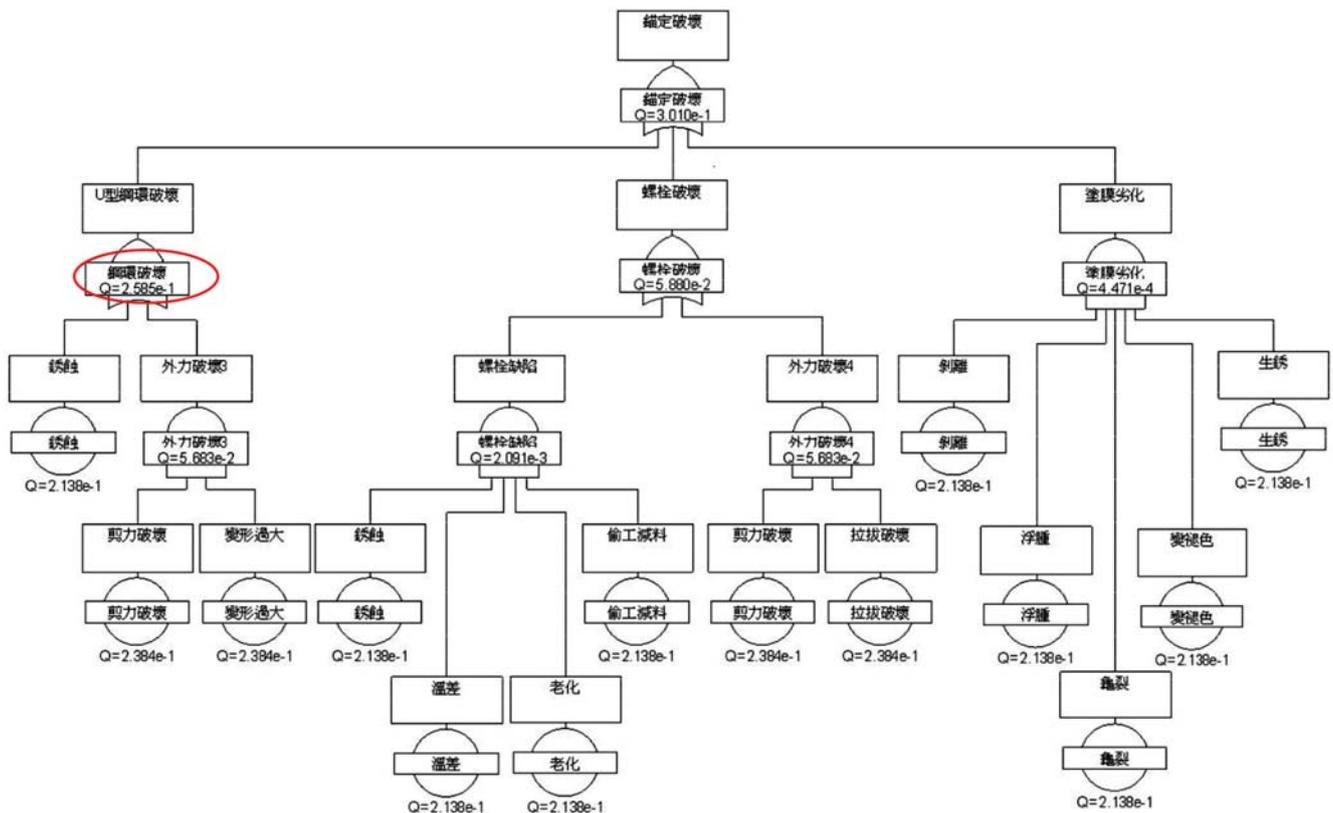
由本研究水管橋量化失敗事件之機率計算，主要分析結果如下：

地震發生	土壤液化	橋梁破壞	錨定破壞	水管掛壞	Consequence	Frequency
w=1.996e-3	Q=4.012e-1	Q=3.037e-1	Q=3.010e-1	Q=2.027e-2	Success Success Success	1.549e-3
Success	Success	Success	Success	Success	Not set	5.700e-4
Success	Failure	Success	Success	Success	Not set	2.486e-4
Success	Failure	Failure	Success	Success	Not set	1.070e-4
Success	Failure	Failure	Failure	Success	Not set	2.215e-6
Failure	Success	Success	Success	Success	Not set	3.819e-4
Failure	Success	Success	Success	Success	Not set	1.666e-4
Failure	Failure	Success	Success	Success	Not set	7.171e-5
Failure	Failure	Failure	Success	Success	Not set	1.484e-6
Failure	Failure	Failure	Failure	Success	Not set	1.484e-6

[以正規化時間 (used time/mean life) 為 0.50 之分析結果為例]

圖 7 水管橋地震災損事件樹分析結果

於事件樹中，鋼材可靠度之正規化時間（使用壽命／平均使用年限）為 0.25（time/mean life）至正規化時間為 1.00（time/mean life）中，其輸水功能失敗事件之機率最高之值分別為 8.483e-4、1.088e-3、1.143e-3、1.156e-3。於事件樹中，鋼材可靠度之正規化使用時間為 0.25 至 1.00，其輸水功能失敗事件之機率最高之值分別為 8.483e-4、1.088e-3、1.143e-3、1.156e-3。



[以正規化時間 (used time/mean life) 為 0.50 之「錨定破壞」事件故障樹分析結果為例]

圖 8 故障樹分析結果

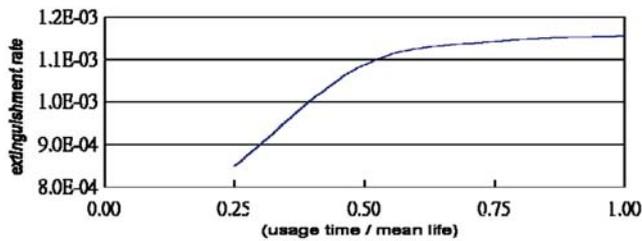


圖 9 輸水功能失效機率趨勢圖

由上述結果得知，失敗事件機率愈來愈高，代表可靠度鋼材會隨時間之增長而鋼材本體之強度減低，使得造成水管之損壞率愈高，鋼材隨時間之增長而失敗機率曲線增高後於正規化時間為 0.50 (time/mean life) 趨於平緩。

於事件樹各正規化使用時間分析結果中可得知，正規化使用時間為 0.25 至 1.00 之控制因子為橋梁破壞與錨定破壞。而由錨定破壞之故障樹分析顯示，於正規化使用時間為 0.50 後，螺栓破壞之控制因子由外力破壞開始轉為螺栓缺陷，此結果可供營運單位依不同使用時間規劃檢測或維修之重點。

於各故障樹之錨定破壞，正規化時間為 0.25 (time/mean life) 至正規化時間為 1.00 (time/mean life) 之控制因子為橋梁破壞與錨定破壞，橋梁破壞之失敗機率值並無隨著時間而變化，而錨定破壞之失敗機率有隨著時間之變化，故以錨定破壞為控制因素，可看出其中由螺栓破壞之外力破壞轉向螺栓缺陷；再進一步地推估，同一控制因子螺栓破壞，隨著時間之增長而其機率值亦逐漸地增高；控制因子由外力破壞轉向為螺栓缺陷後，其機率值亦逐漸地增高。

## 結論

本研究建立水管橋於地震發生後之事件樹與故障樹，研提各基本故障事件參數之量化方法，透過 FaultTree+ 軟體計算各境況之發生機率，並以水管橋進行個案分析。由相關評估過程與分析結果，可綜整以下幾點結論：

透過定量風險分析技術，相較於目前評估方法係以全面性之風險整合考量，本方法可依據災害時序之發展境況，針對不同構件之影響進行考量，並可

依據所設定不同之防護目標，建立不同之事件樹與故障樹。同時評估過程可考量鋼材可靠度隨時間變化之因素，研析防護目標於不同生命週期下之風險管理重點。

本研究透過橋梁易損性曲線與鋼材可靠度分析，推估各相關基本故障事件之失效機率，此方法可簡易提供量化之數據，方便進行初步之評估。

於事件樹中可得知，正規化時間（使用壽命／平均使用年限）為 0.25 (time/mean life) 至正規化時間為 1.00 (time/mean life) 之控制因子為橋梁破壞與錨定破壞，而錨定破壞之失敗機率隨著時間之變化，故以錨定破壞為控制因素，由錨定破壞之故障樹可看出其中由螺栓破壞之外力破壞轉向螺栓缺陷，其失敗機率曲線逐漸地隨著曲線增高後平緩；再進一步地推估，同一控制因子螺栓缺陷，隨著時間之增長而其機率值亦逐漸地增高；控制因子由外力破壞轉向為螺栓缺陷後，其失敗機率曲線增高後於正規化時間為 0.50 (time/mean life) 趨於平緩。

透過定量風險分析技術，相較於目前評估方法係以全面性之風險整合考量，本方法可依據災害時序之發展境況，針對不同構件之影響進行考量，並可依據所設定不同之防護目標，建立不同之事件樹與故障樹。同時評估過程可考量鋼材可靠度隨時間變化之因素，研析防護目標於不同生命週期下之風險管理重點。

## 誌謝

感謝中華民國自來水協會、臺灣自來水公司、臺北自來水事業處等單位協助提供相關資料與營運管理實務之諮詢，使本研究工作得以順利進行。

## 參考文獻

1. American Lifelines Alliance (2001), "Seismic fragility formulations for water systems," Part1and Part2.
2. ASCE TCLEE (1999), "Guideline for the seismic evaluation and upgrade of water transmission facilities," Technical Council on lifeline earthquake engineering Monograph, No. 15.
3. Newmark N. M. (1967), "Problems in Wave Propagation in Soil and Rock," Proceeding of International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, Albuquerque, New Mexico, pp. 7-26.

4. 日本水道協會 (1996),「阪神・淡路大震災水道管路被害の概要, 日本」。
5. 王炳鑫 (2000),「台灣九二一集集地震公共給水管線設備損害報告」, 中華民國自來水協會會刊第十九卷, 第一期, 第 64-81 頁, 台北。
6. 台灣世曦工程顧問股份有限公司 (2008),「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」, 交通部公路總局。
7. 交通部 (2000),「公路橋梁耐震設計規範」, 幼獅文化。
8. 行政院公共工程委員會 (1999),「震後橋梁結構快速診斷及補強手冊 - 震後橋梁結構快速診斷手冊之建立與震後橋梁快速補強手段」。
9. 吳景輝、林家德、高梓木 (2005), 量化風險評估技術與應用, 中華民國第六屆可靠度與維護度技術研討會論文集, 桃園。
10. 吳陽龍、范川江、陳昭明 (2006),「管橋安全檢測及評估」, 自來水會刊, 第二十五卷第四期。
11. 李秉乾 (2008), 利用集集大地震震損資料建立建物易損性曲線之研究, 碩士論文, 逢甲大學土木工程研究所, 台中。
12. 李崇正、周建捷、許文科、熊大綱、陳柏成、溫惠鈺 (2001), 地下維生線系統耐震即改善之研究, 行政院公共工程委員會, 台北。
13. 李敏誠 (2008), 地下管線受震之損壞研究, 國立台灣大學土木工程研究所, 台北。
14. 施邦築、張晉添、陳偉堯、曾惠斌 (2000), 九二一集集地震維生管線損害之後續調查與初步研究, 國家地震工程研究中心, 台北。
15. 施邦築、葉錦勳、劉季宇 (2006),「台北區地下自來水管線地震危害度之研究」, 台北自來水處研究期末報告。
16. 許芳勳 (2001),「動態可靠度模型之探討及其應用」, 博士論文, 國立中央大學。
17. 陳思達 (2005), 光碟製成設備故障樹分析與動態可靠度估算, 國立中央大學機械工程研究所, 桃園。
18. 蔡錦松 (2003), 維生管線地震危害度分析整合型研究, 行政院國家科學委員會, 台北。
19. 賴明皇 (2004),「台灣地區公路橋梁特性統計分析之研究」, 碩士論文, 國立中央大學。
20. 簡賢文、柯孝勳、謝蕙如、王廣文、許文勝 (2009),「重要設施防減災策略研擬與定量風險評估技術應用」, 國家災害防救科技中心技術報告。

# 吉翁企業有限公司

## JI WENG SCAFFOLD LTD.

專業鋼管施工架製造廠商  
從材料製造到工程承攬  
吉翁以全方位的服務提供您專業諮詢

### 吉翁移動式施工架影片介紹



YouTube

### 吉翁水平踏板生產流程影片



YouTube

### 吉翁關節伸縮扶手先行影片介紹



YouTube

### 吉翁鷹架小桁架影片介紹



YouTube

### 吉翁斜角度水平踏板(桶槽架)



YouTube

### 吉翁斜角通用三角架影片介紹



YouTube

### 吉翁可掀式防墜網支架影片



YouTube

### 吉翁伸縮樓梯影片介紹



YouTube

### 吉翁壁連座(壁拉桿)施工流程簡介



YouTube

官網: [www.scaffold.com.tw](http://www.scaffold.com.tw)

基隆廠: 基隆市六堵科技園區工建路17號

台中廠: 台中市大甲區大安港路208號