



從維生線系統震害省思 其耐震減災課題

劉季宇* / 財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心震災模擬組 研究員

本文旨就 1999 年九二一地震、2016 年高雄美濃地震、2018 年花蓮地震、2024 年花蓮外海地震，針對四次致災性地震中，自來水及電力管線設施的主要震害，以及其對供水、供電系統的影響進行觀察，從而省思維生線系統（Lifeline systems）的耐震減災課題，提出以下耐震改善建議：(1) 早年興建之維生線系統，或受限於先天條件，或缺乏避災考量，或當時耐震設計知識不足致使耐震性能較有疑慮，應根據新的活動斷層圖與液化潛勢圖，以及新版耐震設計規範，分階段完成地震風險評估及耐震補強；(2) 重要管線與設施應具有可運作之備援體系，惟應特別留意備援成立之條件，若無法避免損害，則須確保可快速修復；(3) 許多設備錨定或管路附掛的方式容有耐震疑慮，事業單位應進行盤點並著手改善，屬簡單可行且有立即助益；(4) 自來水或公用天然氣管網的小區劃分，小區邊界配置適當閥栓，可以有效隔離故障，是管網損害控制的有效作法。

前言

我國位處環太平洋地震帶，發生強震的機率極高。陸上遍佈數十條活動斷層，許多平原、盆地及灣岸地區為容易發生土壤液化的沖積、回填區域，地震防減災工作責無旁貸。維生線系統（Lifeline systems）泛指自來水、電力、天然氣、下水道、通輸等系統，是民眾社會賴以生活維持的基礎建設，其特色是由許多管線、設施所構成，呈廣域空間分布與複雜運作型態，所承受的地震風險相對較高，局部損害即可能導致大範圍甚至完全的系統失效。在過去二十多年間，我國經歷四次主要的致災性地震，維生線系統均曾受損，本文以其中的自來水、電力系統為重點，觀察並省思歷年地震的震害經驗，從而就維生線系統的耐震減災課題提供觀察及建議。

* 通訊作者，karl@narlabs.org.tw

九二一地震之震害

九二一地震發生於 1999 年 9 月 21 日凌晨 1 時 47 分，地震芮氏規模 7.3，震央位置北緯 23.85 度、東經 120.82 度，也就是南投縣集集鎮境內，震源深度 8 公里，為台灣光復以來陸上規模最大、傷亡最慘烈的地震事件。這次地震引致台灣自來水公司（以下簡稱台水公司）供水系統嚴重損害，大台中地區 70 萬用戶面臨無水可用之困窘。

台中的水源取自大甲溪流域石岡壩與大安溪流域鯉魚潭水庫，分別經原水管道送至豐原淨水場與鯉魚潭淨水場，震前兩個淨水場合計供水約 110 萬 CMD（立方公尺/日）。根據葉純松「九二一地震大台中地區供水危機處理」一文，主要震害包括石岡壩（水源設施）與豐原第一淨水場（淨水設施）嚴重毀損、石岡壩南幹渠引水隧道（導水設施）因地層錯動扭曲破裂而無法運作，參考圖 1。由於導水幹渠損害，震後初期無法由石

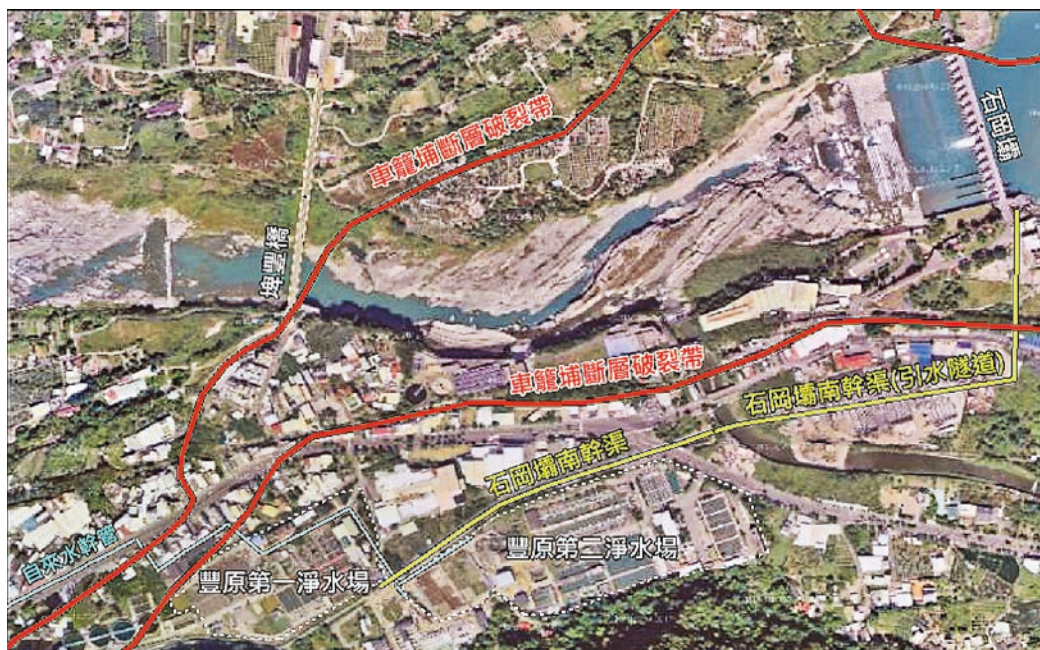


圖 1 九二一地震車籠埔斷層破裂帶北段附近重要供水設施分布情形

岡壩供水，須由鯉魚潭水庫（淨水場）出水，俟八寶圳緊急臨時引水完成後，豐原淨水場才得以恢復部分出水。其次，豐原第一淨水場因緊鄰斷層破裂帶，幾近全毀，包括 15,000、17,000 噸兩座清水池、各期膠羽池及沉澱池、口徑 2,000 mm 出水鋼管等，參考圖 2。豐原第二淨水場也嚴重損害，僅可勉強出水。

大台中地區用水，高度集中於石岡壩與鯉魚潭水庫提供原水，亦高度仰賴豐原淨水場與鯉魚潭淨水場

這兩處大型淨水場出水，如圖 3 所示，此為先天條件使然，無法改變。這次地震中，車籠埔斷層錯動導致石岡壩南幹渠、豐原淨水場的破壞，有如常人斷去一只手臂。幸好鯉魚潭水庫與淨水場，以及相關的原水與清水幹管，即使距離車籠埔斷層不遠，但因位於斷層的下盤，地震動劇烈程度相對較小，而且沒有土層破壞，所以皆無損壞，可勉強維持大台中地區正常供水的一半，這是不幸中的大幸，否則後果不堪設想。

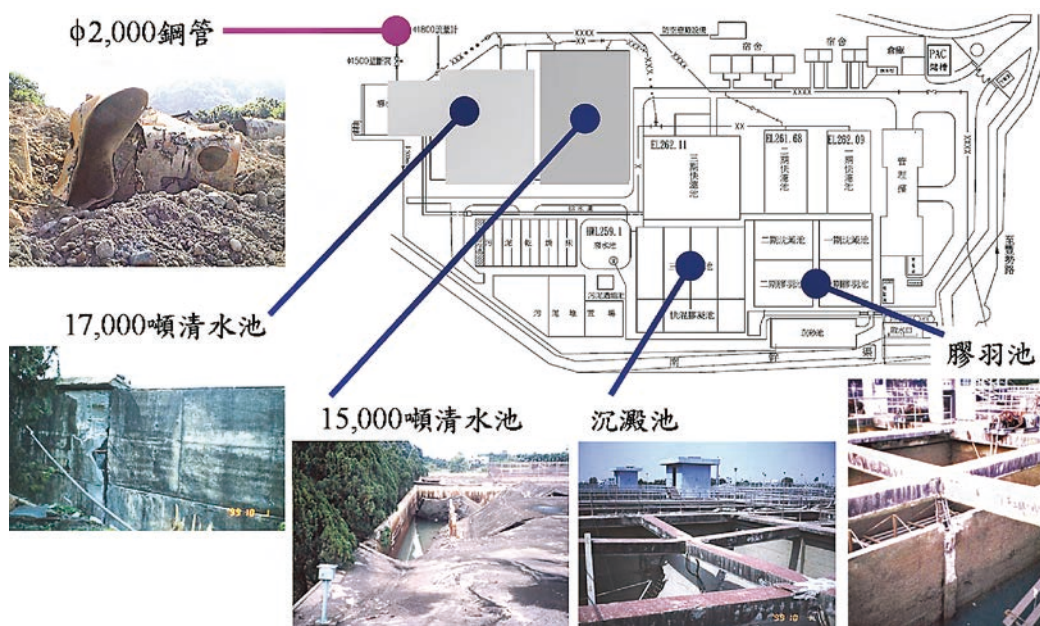


圖 2 九二一地震豐原第一淨水場震害(台水公司提供)



圖3 大台中地區雙水源之上游管線設施與鄰近斷層分布情形

九二一地震對電力系統亦造成嚴重衝擊，地震當下電力瞬間中斷，造成嘉義以北地區全黑（Blackout）的局面，斷電總用戶數達六百八十萬戶，以用戶來算是史上最嚴重的停電災情。停電肇因於中部多處發電廠、開關場、變電所、輸配電塔線，同時發生嚴重毀損、倒塌或傾斜。根據台灣電力公司「九二一大地震電力系統事故報告」，震後一段時間，須將全島電力系統分隔為北、中、南三個系統單獨運轉，其中彰化以北的大部分地區，因電力設備受創嚴重及發電量不足，供電斷斷續續。

當時電力系統連接各發電廠與變電所的 345 KV 超高壓輸電迴路，有 28 條受損，許多是位於人員機具難以進入的山區。另外，有 17 座變電所受損，包含 6 座超高壓變電所、8 座一次變電所、3 座一次配電變電所，天輪超高壓變電所受損嚴重無法修復，中寮超高壓開閉所受創慘重。震害原因，除了劇烈的地震動外，中寮超高壓開閉所以及許多超高壓輸電線路（鐵塔），都不幸或無可避免地佈建在車籠埔斷層的斷層帶上，因斷層錯動而受創，情況與自來水系統類似。

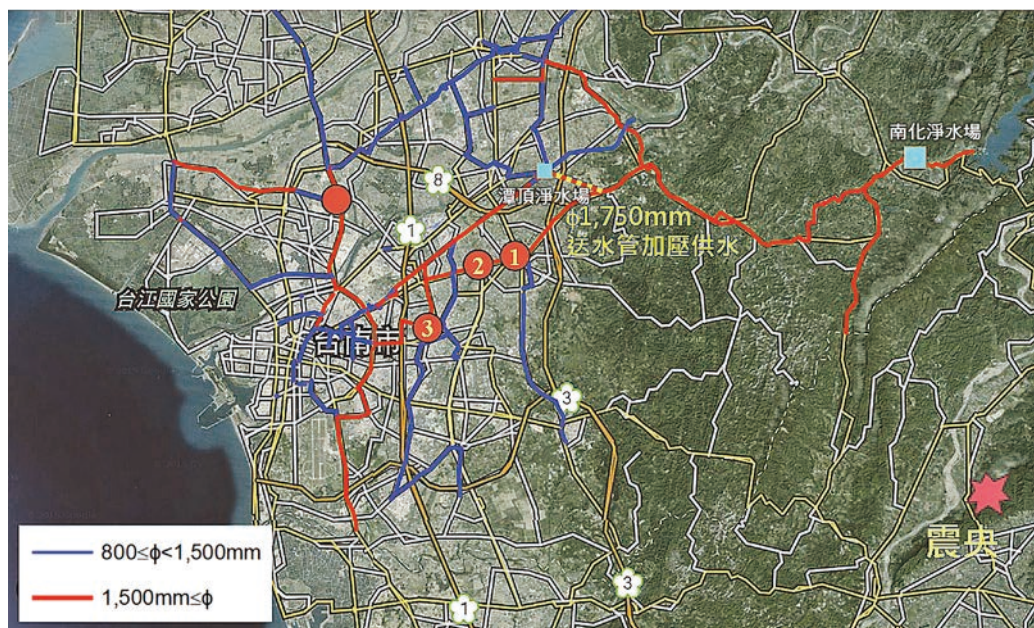
台灣本島電力系統當時依賴「南電北送」，即北部用電量較高，必須由南部的發電廠補足用電缺口，主要由通過中寮開閉所的兩條超高壓輸電迴路往北輸電，其受創造成電力系統南北解聯，電力失衡，北部電力系統崩潰。地震發生後，當時李登輝總統依憲法頒布緊急命令，將台電公司興建中的第三迴路超高壓輸電工程，納入災後搶救重建工程的適用範圍，中北段工程因此亦得以儘速完成，對於提升南電北送可靠度的幫助很大。

高雄美濃地震之震害

2016 年 2 月 6 日凌晨 3 時 57 分，高雄市美濃區發生芮氏規模 6.6 地震，震央位置北緯 22.92 度、東經 120.54 度，震源深度 14.6 公里。本次地震對台南市供水造成嚴重損害，以管線震害為主，災損總數高達 2,031 件。台南市自來水系統若以曾文溪為分界，溪南的供水區域規模較大，由南化、潭頂、山上、鏡面等四座淨水場供水，最大的是南化淨水場（設計出水量 80 萬 CMD），其次潭頂淨水場（19.5 萬 CMD），山上、鏡面淨水場規模均甚小。由於南化淨水場下游的口徑 2,000 mm 送水管路（南化送水管），在本次地震中發生三處損壞，參考圖 4 的數字標註，導致供水困難，加以修繕工作因故有所延遲，又正逢農曆春節，台水公司因此頗受壓力，必須全力動員搶修。

南化送水管這三處損壞的情形為：(1) 新化區忠孝路 2,000 mm 送水管：此段管路沿台 20 線穿越新化市區，採用 1,205 公尺的 WSP 推進管，埋深 8 公尺，兩處發生圓周斷裂漏水。由於埋深關係，須進行深開挖，並於數百公尺的狹隘管道內搬運物料及進行焊接，施工困難。(2) 永康區開運橋西側管路，獨立水管橋鋼管下地接預力混凝土管之特殊接頭發生脫接漏水，可快速修復。(3) 永康區永大路二段維冠金龍大樓前，百餘公尺的預力混凝土管遭大樓倒塌撞擊而碎裂受損，如圖 5 所示。

南化送水管的震害，導致台南地區供水發生危機，台水公司乃以南化淨水場下游，往新市區方向（潭頂淨水場）的 1,750 mm 送水管路作為備援，參考圖 4，提高水壓，增加該管路對台南市區的供水量。新化區忠孝路 WSP 推進管損壞，須進行深開挖，並於數



百公尺的狹隘管道內進行修漏，永康區永大路二段的管路修繕，則因人命搜救而推延。這兩處災損，為搶修工作的最大瓶頸，遲至 2 月 24 日方得同時修復，恢復全面供水，這已經是震後第 18 天的事情了。

由於南化 2,000 mm 送水管震害且延遲修復，導致台南地區長期供水困難，突顯在自來水系統中，送水管過度集中所帶來的風險，設置備援管線以提升系統贅餘度實有其必要性。這次地震往新市區方向（潭頂淨水場）的 1,750 mm 支線幸未受損，提高水壓後可以勉強增加供水。再者，重要的維生線設施管線倘若無

法避免損壞，則可否快速修復就變得十分重要，這次地震後台水公司已另覓時機，將新化區忠孝路 WSP 推進管，汰換為埋深 1.2 m 的一般管線，以確保未來一旦損壞時容易修復。

2018 年花蓮地震之震害

2018 年 2 月 6 日晚間 23 時 50 分，花蓮發生強震，震央位於北緯 24.10 度、東經 121.73 度，位於近海，地震規模芮氏 6.2，震源深度 6.3 公里。本次地震造成 17 人罹難、291 人受傷。由於米崙斷層與嶺頂斷

層在地震中均發生錯動，故而可以確認震源的破裂機制由外海延伸至陸地，導致兩個斷層帶上有明顯的近斷層效應，包含斷層跡線上的土層錯動破壞。

自來水系統損害集中於花蓮縣花蓮市，由花蓮供水系統供水，以管線震害為主，致花蓮市區及美崙、新城地區停水戶數高達 4 萬戶，破管件數高達 1,147 處，支援修漏廠商 34 組人力投入復水工作。花蓮供水系統的供水範圍包含花蓮市、吉安鄉、新城鄉、壽豐鄉及秀林鄉等。

本次地震大口徑管線的三處災損，皆位於米崙斷層寬 300 m 的斷層帶內，如圖 6 所示，說明如下：(1) 花蓮市新興路近尚志路路口的 500 mm 鋼管，乃尚志配水池出水、供應美崙、新城地區用水之重要管路，鋼管受斷層錯動影響發生嚴重的扭曲及挫屈。(2) 尚志橋附掛兩條 600 mm 鋼管，乃負責向東送水至美崙溪左岸地區之重要幹管，斷層跡線正好通過尚志橋西側，為地下管線上橋位置。尚志橋在地震中發生輕微損害，主要為兩端橋台處的擠壓及伸縮縫破壞；兩條附掛管線則接頭鬆脫漏水共三處，部分如圖 7 所示，致使美崙、新城地區震後斷水。(3) 明禮路上 400 mm 鋼管，管體發生均勻

的環狀挫屈。由於附近的管路布置包含 90 度的彎角，以力學而言近似於局部錨定，一旦斷層錯動作用為管軸方向的軸力加載時，便會發生如此之破壞模式。

本次地震中斷層錯動導致管線的損壞，突顯斷層帶範圍內的主要管線，事先應有良好耐震設計、選用耐震管材，或作其他的設防對策。其次，藉由固定方式改善，以及伸縮可撓接頭容許變形能力提升，附掛管線之損壞應可有效避免。

2024 年花蓮外海地震之震害

2024 年 4 月 3 日上午 7 時 58 分，花蓮近海發生芮氏規模 7.2 強烈地震，震央位於北緯 23.77 度、東經 121.67 度，震源深度 15.5 公里。本次地震造成 18 人罹難、1,155 人受傷、3 人失蹤。本次地震為九二一地震以來規模最大地震，餘震數量較多且持續相當長時間，然而或因震源機制不同以及破裂機制並未延伸至陸地，因此災害程度雖亦嚴重，但與九二一地震相比又小了許多。

本次地震的自來水系統損害，亦集中於花蓮供水系統，亦以管線震害為主，口徑最大者為花蓮市中正橋兩端



圖 6 2018 年花蓮地震米崙斷層帶上供水管線震害分布情形（照片由台水公司提供）

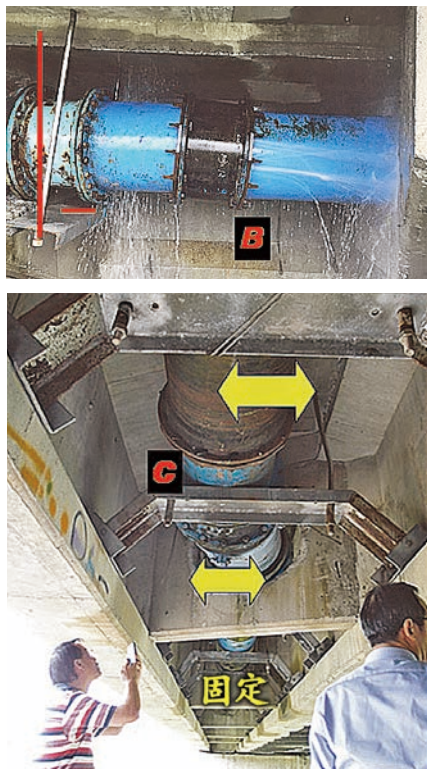


圖 7 2018 年花蓮地震尚志橋兩側附掛自來水管線之震害
(台水公司提供)

的 600 mm 過橋管漏水，原因為接頭脫接，如圖 8 所示。本次地震的停水戶數 10,248 戶，破管件數 253 處，支援修漏廠商 15 組人力投入復水工作，四天完成全面復水。

若將 2018、2024 年兩次花蓮地震中的花蓮供水系統震害進行比較，可整理如表 1 所列，可知本次地震雖然地震規模高出甚多，但自來水破管件數及停水戶數均顯著減少，並且在檢漏與修漏人力都較少的情況下，恢復供水時間卻反而更快。究其原因，實乃台水公司過去六年的管網體質及監控管理方面的實質提升，在本次地震中發揮了耐震減災與快速復原的成效。

在管網體質方面，首先是台水公司長期持續進行的管線汰換計畫，將老舊預力混凝土管及 PVC 管，有系



圖 8 2024 年花蓮外海地震中正橋兩端之過橋管脫接發生漏水
(台水公司提供)

表 1 花蓮供水系統近年震災分析 (台水公司提供)

芮氏規模	2018 年 2 月 6 日 花蓮 M6.2 地震	2024 年 4 月 3 日 花蓮近海 M7.2 地震
震度 (花蓮)	7 (註:氣象署舊制震度)	6 強
停水戶數	40,000	10,248
恢復供水 (天)	8	4
破管件數	1,147	253
檢漏人力 (人)	80	23
修漏人力 (組)	34	15

統地更新為耐震性能較佳的 K 型接頭延性鑄鐵管，甚至試辦日本耐震延性鑄鐵管的導入，目前花蓮供水系統的管種耐震比例已達 73%，致使供水韌性大幅提升。其次，台水公司近年推動降低漏水率計畫，進行配水管網的小區 (DMA, District metering area 之縮寫) 的劃分，從而實現分區計量與故障隔離的技術目標，目前花蓮縣各供水系統均已廣設小區，總數達 147 個、覆蓋率逾 90%。至於監控管理方面，台水公司自行開發大數據智慧水網分析 (Water Advanced Data Analysis, 簡稱 WADA) 系統，配合小區的供水管理，可以即時監控整個供水系統的水壓與流量，平時作為降漏分析的前端工具，強震後更可以掌握異常狀況，研判災損並遂行處置。圖 9 所示，即本次地震當天花蓮供水系統在 07:30 (震前)、08:00 與 09:00 三個時段的水壓監控情形 (燈號：紅 → 無水、橘 → 水壓低於常態達 3 個標準差、藍 → 正常、紫 → 高於常態達 3 個標準差、黑 → 斷訊)，整個系統的水壓狀況可以一目瞭然。

結語

整合以上四次地震的震害經驗，吾人可以歸納出維生線系統耐震減災的幾點重要課題：

1. 我國維生線系統自民國六十年以降，配合經濟高速成長而大量建設，然而受限於先天條件，例如淨水場必須選址於條件較佳的水源附近，或是發電廠比鄰進口燃煤的港區，加以早年缺乏地震地質敏感區域的認識與掌握，大型設施或重要管線，無法作到完善的避災考量，耐震設計知識和實務亦有所不足，與今日不可同日而語。如今，活動斷層圖與液化潛勢圖已經齊備，耐震設計規

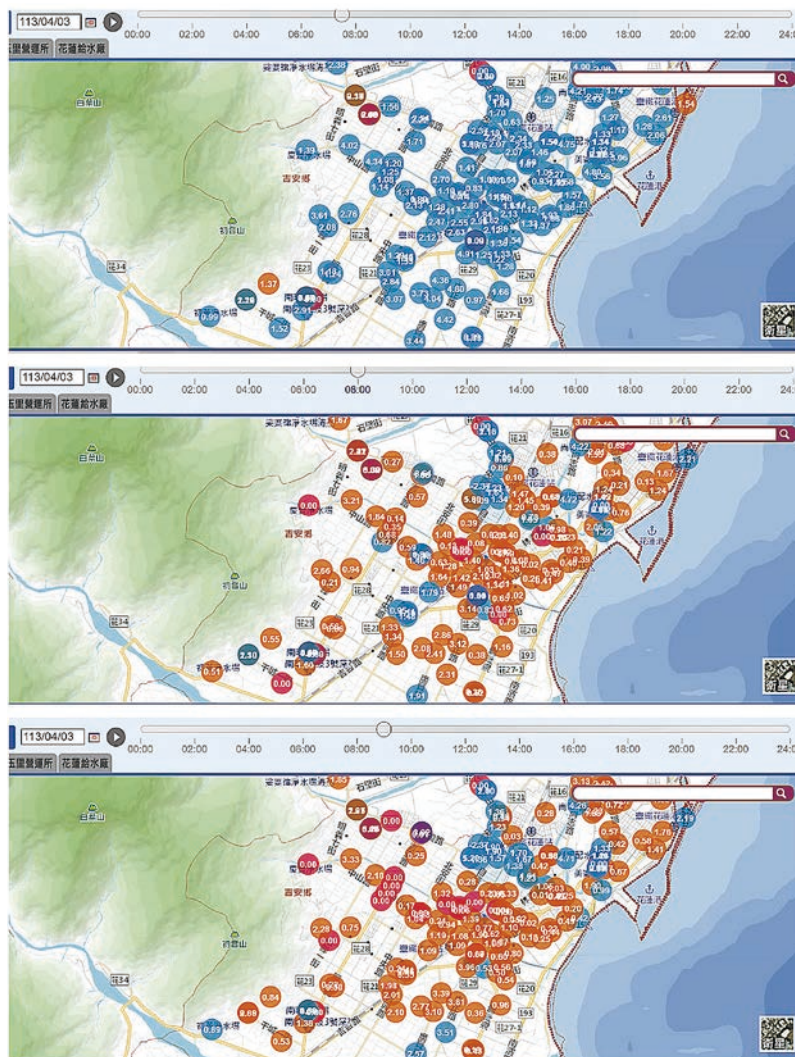


圖 9 2024 年花蓮外海地震前後花蓮供水系統水壓監控變化情形（台水公司提供）

範亦有長足進步，經由地震災害暴險分析與老舊管線設施盤點，應可辨識其中耐震安全較有疑慮者，列為改善標的，分階段進行耐震評估及補強。

2. 重要管線設施應具有可運作之備援體系，以提昇維生線系統的可靠度。以備援管線而言，在可能地震條件下，應不與主要管線同時損壞（例如通過同一條活動斷層），並且具有足夠的服務效能（例如達主要管線供水或供電能力的 50%）。倘若無法避免損壞，則退而求其次，應確保可以快速修復，不論維修可行性、可及性、所需備品與機具、修復策略等都須予檢視。
3. 許多設備錨定或管路附掛的方式，容有耐震疑慮（如尚志橋的兩條附掛管線），一旦損害對於維生線系統運作影響極大。然而，這些錨定或附掛的耐震改善並不困難，所需經費亦不多，值得事業

單位進行盤點並予以改善，對於提升維生線系統的耐災能力，屬簡單可行且有立即助益。

4. 維生線系統在都會區常以管網方式建置及運作，例如自來水或公用天然氣。日本自 1964 年新潟地震後，汲取教訓，致力將這些管網進行小區劃分，小區邊界配置適當閥栓，損壞一旦發生可以有效隔離故障，限束影響不使擴大，而且容易逐區遂行修復，已被證明是管網損害控制（Damage control）的有效作法，此點在這次 2024 年花蓮外海地震中亦充分得到驗證。

誌謝

台灣自來水公司提供歷年自來水系統地震災損資料與解說，本文因得以完成，謹此致謝。本文中包含台灣自來水公司提供之照片及圖片，版權歸其所有。