



非破壞性探勘技術應用於道路沉陷 緊急搶修之探討 — 以鄭州路、環河北路口事故為例

彭振聲／臺北市政府工務局 局長

楊明祥／臺北市政府工務局 副局長

張凱堯／臺北市政府工務局水利工程處 總工程司

邱志榮／台灣世曦工程顧問股份有限公司 工程司

都會區發生道路沉陷將衝擊市區交通，造成用路人之不便，甚或嚴重影響安全，因此搶修工作往往是刻不容緩。本文案例應用非破壞式探勘技術，快速探查道路災損範圍、地下結構物與管線分布狀況，在改善方案研擬、地質改良效果確認上，有相當之成效。另簡要說明地下排水箱涵結構嚴重破損之緊急處置及後續重建過程，藉由本案例搶救經驗分享及精進作為探討，以提供工程界處理類似案件之參考。

ABSTRACT

Road subsidence will affect urban traffic, causing inconvenience or even affecting safety to pedestrians so that the emergency repairs are usually urgent tasks. Non-destructive exploration techniques are used to quickly explore road damages and distributions of underground structures and pipelines. In the improvement plan proposed and the effect of soil improvement, non-destructive exploration techniques have also achieved considerable results. A brief description of the emergency disposal of severely damaged underground drainage box culverts and the subsequent reconstruction process have also been presented in this article. By means of the rescue experience sharing and advance discussion, it is expected that the description of this article would be served as a reference basis for the similar engineering cases in the future.

前言

現代化城市因人口密集交通繁忙，市區道路負荷相對沉重，維生管線亦多密佈於道路下方，維生管線若有破損、沉陷甚至是脫管情況發生時，通常會導致路面沉陷，除影響用路安全外，甚至有瓦斯氣體外洩之疑慮。因此，維生管線之搶修工作往往是刻不容緩，且必須將道路影響降至最低。本文係以鄭州路、環河北路口道路沉陷事故為例，說明事故之處理過程，及導入非破壞性探勘技術（透地雷達、低頻電磁波）調查災損範圍、地下結構物與管線，作為案址改善工程輔助決策參考依據，以求在最短時間內迅速動員緊急救災物料及人力並限縮災損事故衝擊範圍。透過案例處理之經驗分享、未來維護管理精進作為及免開挖工法如：CIPP、SPR 等技術之討論，期待可提供類似案例之參考。

案例概述

北市大同區環河北路與鄭州路口於 106 年 12 月 6 日上午 9 時發生路面、人行道掏空下陷（詳見圖 1、圖 2）。經市府工務局新建工程處邀集相關單位，現場檢視權管設施後，發現鄭州路下方雨水箱涵側牆及底版有缺口、破損，需辦理改善（詳見圖 3）。水利工程處（以下簡稱水利處）除立即動員辦理緊急搶救工作，並委託國內具搶救災經驗之大型工程顧問公司，指派土木、結構及大地技師群，共同協助辦理搶救及後續修復工作。

事故處理

一般而言，緊急搶救事故，其主要之辦理原則可分為下列五點：

1. 調查並確認災損範圍，利用現場觀察既有結構裂縫、地形測量、地球物理探測、蒐集既有管線資料及鑽探等方式，確認事故影響之範圍。
2. 評估可能致災原因，透過上述調查成果，可初步辨識出可能致災原因，以辦理後續搶救作業，並於過程中加以確認。
3. 穩定地盤避免二次災害，以回填混凝土、緊急灌漿等方式，先行穩定地盤。避免地盤再次陷落，引發其他維生管線災害。針對箱涵結構嚴重破損部分，除緊急以鋼板補強，並於箱涵內安裝補強鋼框，同

時封閉慢車道以避免發生崩塌而危及用路人及搶救人員安全。

4. 建立安全監測系統，迅速於工址建立監測基準點及相關監測系統，擴大觀察災損區之變化及改善方案成效。
5. 研擬後續復舊方案，搶救階段應及早進行復舊方案之研悉與規劃，以調整搶救工法與施工程序，可降低未來復舊之難度。

本案例事故處理分為二階段分別辦理緊急搶救及箱涵復舊工作。其中，搶救階段以穩固鬆弛地盤及穩定箱涵結構為主，利用災損範圍之調查成果，安排第一階段灌漿範圍參見圖 4 及圖 5，第二階段灌漿範圍參見圖 6，箱涵安裝補強鋼框參見圖 7。



圖 1 事故工址範圍示意圖



圖 2 人行道掏空及道路下陷情況

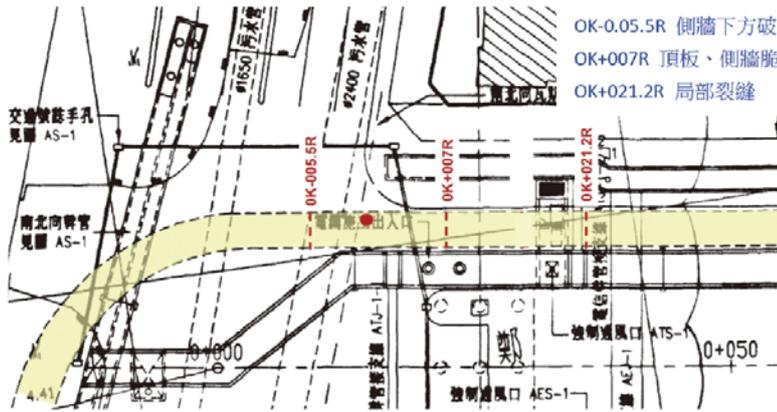


圖 3 排水箱涵內破損狀況

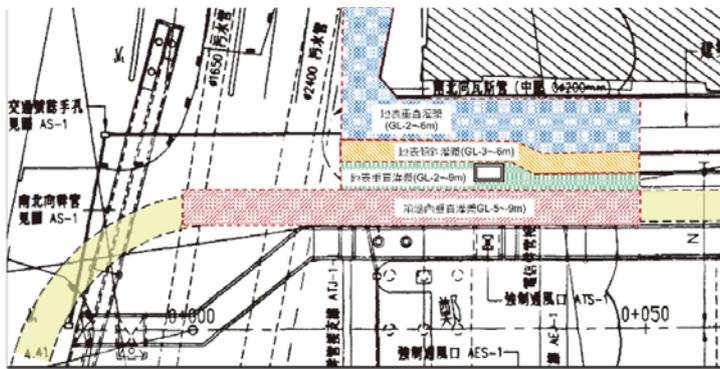


圖 4 第一階段灌漿範圍平面示意圖



圖 7 箱涵安裝補強鋼框

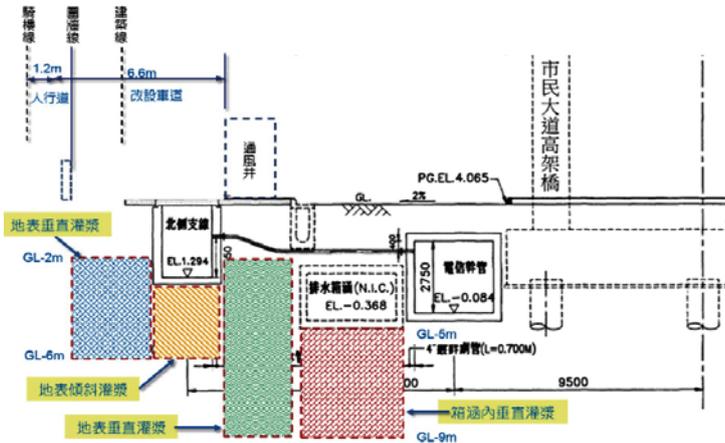


圖 5 第一階段灌漿範圍剖面示意圖

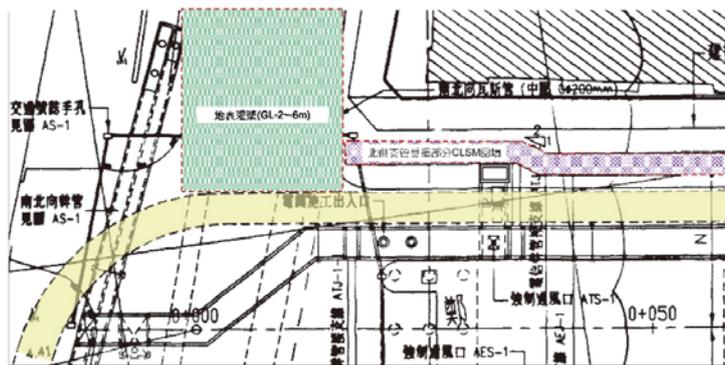


圖 6 第二階段灌漿範圍平面示意圖

復舊階段，考量部分箱涵結構受損嚴重，且需於汛期來臨前完成箱涵改建復舊工作，因此採用施工最為快速之明挖工法辦理施工。惟為降低該路段之交通衝擊，故將鄭州路局部向北遷移至人行道，維持 2 車道各 3.3 m 車道供車輛通行，並協調臨時拆除忠孝國中活動中心部分圍牆，以設置 1.2 m 人行道，詳圖 8。

各階段主要之工作紀要，已分別摘錄如表 1、表 2，可提供後續類似案例參考。

非破壞性探測

針對災損範圍調查部分，本案例於執行過程中除利用傳統透地雷達進行地球物理調查外，因透地雷達僅能探查淺層 2 ~ 5 m 左右之地層之狀況，針對工址較深層之空隙調查，特委託臺灣大學地理系協助以其近年所開發之低頻電磁波進行調查，以下將分別就其成果進行說明。

- ◆ 施工路段鄭州路西向車道，借用既有人行道向北遷移。
- ◆ 需協調忠孝國中法定退縮用地及駁除部分圍牆作為人行道。

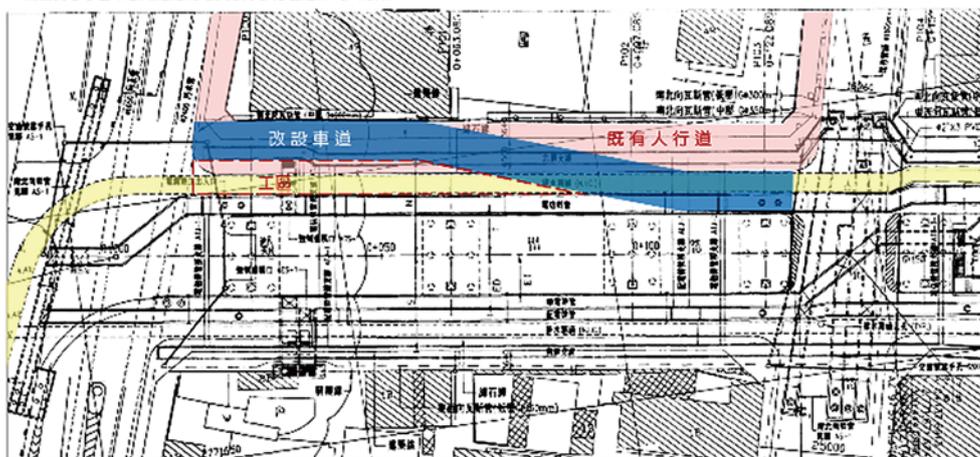


圖 8 復舊階段車道改道示意圖

表 1 緊急搶救階段紀要

日期	內容
106.12.06	1. 上午 9:00 會勘確認雨水箱涵破損。 2. 台大低頻電磁波進場調查。 3. 緊急開挖人行道箱涵側牆破損處，發現掏空長度約 15 m、寬度 1~2 m、深度大於 6 m，緊急回填灌漿 185 m ³ 混凝土。
106.12.07	1. 水利處緊急會議，研擬初步改善措施。 2. 透地雷達進場，調查人行道及箱涵底板、側牆。
106.12.08	1. 設置高程控制點，持續監測沉陷。 2. 地表沉陷區開始鑽孔回填灌漿。 3. 發現 0K + 5.5R 處底板破損嚴重，以鋼板封閉補牆，並進行箱涵內部止水灌漿。
106.12.10	1. 路口轉角人行道鋪面破除開挖，發現掏空約 3.5 m 深，緊急回填灌漿 27 m ³ 混凝土。 2. 增加灌漿機組。 3. 箱涵下方橫越鄭州路之 700 mm 污水管，遭灌漿材阻塞。
106.12.11	1. 相關單位會勘後發佈新聞稿，封閉排水箱涵上方外線車道。 2. 箱涵內補強鋼樁進場安裝。
106.12.12	1. 調整施工順序及灌漿材料。 2. 共同管道北側支管受損狀況會勘。
106.12.13	1. 透地雷達補充調查環河北路及鄭州路道路現況。 2. 忠孝國中活動中心地下室現況勘查。
106.12.14	1. 辦理各管線單位會勘。
106.12.15	1. 緊急搶救及箱涵復舊方案核定。
106.12.16	1. 台大低頻電磁波進場調查。
106.12.18	1. 箱涵復舊交雜改道方案會勘。 2. 第一階段緊急搶救灌漿完成。

表 2 箱涵復舊階段紀要

日期	內容
106.12.19	1. 公園處路燈及植栽移植辦理原則討論。
106.12.20	1. 台大低頻電磁波進場調查。 2. 忠孝國中活動中心委託辦理建物現況調查。
106.12.22	1. 發布新聞稿，說明交雜改道事宜。
106.12.25	1. 箱涵復舊交雜改道方案現勘討論。
106.12.27	1. 植栽移植完成。
106.12.28	1. 共同管道北側支管受損部 CLSM 回填。 2. 第二階段環河北路回填灌漿開始作業。
106.01.07	1. 切換替代道路。 2. 進行管線試挖。
106.01.08	1. 配合試挖成果調整擋土壁施作方案。
107.01.11	1. 箱涵重建段起迄點施作圍堰。
107.01.13	1. 箱涵重建段擋土壁施作完成。
107.01.16	1. 箱涵重建段覆土開挖。
107.01.18	1. 開挖後支撐架設完成。
107.01.19	1. 箱涵重建段箱涵頂板敲除。
107.01.21	1. 箱涵重建段起迄點圍堰補強。 2. 開始敲除箱涵底板。
107.01.24	1. 重建段箱涵敲除完成。 2. 重建段底部 PC 完成。
107.01.25	1. 第二階段環河北路回填灌漿作業完成
107.01.28	1. 重建段箱涵頂板澆置完成。
107.02.07	1. 鄭州路全面開放通車。

透地雷達調查成果

透地雷達探測針對事故範圍進行地表及箱涵內調查，主要目的為調查該區域地下地層狀態，以期能發現地面下異常區域分佈範圍，提供相關訊息作為後續施工建議之參考依據。

環河北路鄭州路口人行道，主要異常狀態包含：路基下陷、空隙、空洞區域、共同管溝及灌漿回填區，將路基下陷、空隙、空洞區域等異常區標示於測區平面圖上如圖 9 所示，各測線統計之空隙較發達範圍為深度 0.3 m ~ 0.65 m 之間。

排水箱涵，主要異常狀態包含：箱涵結構斷裂、掏空，將箱涵結構背後異常掏空區標示於測區平面圖上如圖 10 所示，各測線統計之預估掏空範圍為 0.2 m ~ 0.4 m 之間。

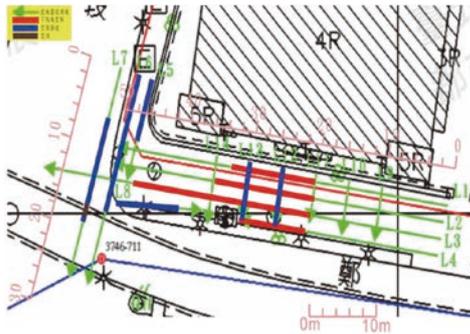


圖 9 透地雷達判釋異常位置圖 (106.12.07)



圖 11 環河北路鄭州路口異常區域圖 (107.12.13)

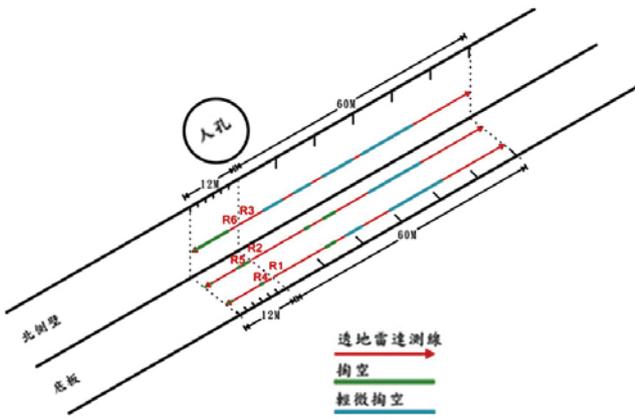


圖 10 排水箱涵測線異常區域分布圖 (106.12.07)

環河北路鄭州路口車道，主要異常狀態包含：路基下陷及疑似下陷、空隙發達區及灌漿回填區，將路基下陷及疑似下陷、空隙發達區及灌漿回填區等異常區標示於測區平面圖上如圖 11 所示。

低頻電磁波調查成果

低頻電磁波探勘儀主要係以天然電磁波概念出發，不發射電磁波，屬被動式遙測。探勘原理係以被動式方法由接收儀器 - 傳感器 (Transmitter) 接收反射回來的超低頻段電磁波，再轉換為電壓值 (V, 單位為毫伏特 mV) 與電磁電阻率 (ρ , 單位為 $\Omega \cdot m$)。基於量子力學 (Quantum Mechanics) 中的能量守恆不變原理，在一個物理系統內，反射回地表的這部分電磁波，其頻率的大小及量值 ($U = q \times V$) 的多寡、介面的深度，都與物性特徵有關。低頻電磁波探勘方法即是將地下反射回來的不同頻率之電磁波通過接收放大，轉變成「電壓值」，以擷取地下物質資訊。

低頻電磁波調查所使用的探測儀器為 SYT 物性地勘儀 (垂直解析度 1 m)、以及 DGT 工程探測儀 (垂直解析度 10 cm)。SYT 探測標的物以尺度較大的地下質

(地下物質之強弱區分)、含水狀況 (地下物質含水量之多寡) 為主，DGT 探測標的物以尺度較小的管線、管溝及人為結構物為主。

工址緊急灌漿前，使用低頻電磁波探勘儀 (DGT) 進行調查。探測位置忠孝國中西南側之人行道 (鄭州路與環河北口旁)，探測標的為地下質、含水量分佈狀況以及 700 mm 污水管位置，以探測資料找尋沉陷範圍。由圖 12 之視電阻率多為 70 以下可知，探測區相當鬆散，含水量高，易造成地下淘空。本探測區之疑似淘空範圍可分為四層，由以第一層的最為嚴重 (環河北路人行道)，淘空延伸至共同管道北側支管方向。第二層與三、四層有相互連接的情況，而第四層延伸至 700 mm 污水管的位置。

於人行道灌漿階段，使用低頻電磁波探勘儀 (SYT) 進行調查。探測標的為人行道與馬路 (環河北路) 之地質、含水量分佈狀況。由圖 13 之視電阻率多為 70 以下可知，探測區相當鬆散，含水量高，易造成地下淘空。A-C 測線已灌漿區域，呈現紅藍色的視電阻值較高，代表此區域物質較堅硬。

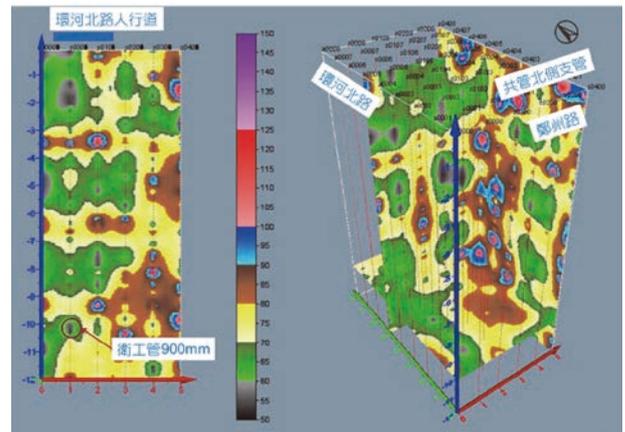


圖 12 灌漿前人行道 DGT 探測成果 (106.12.06)

於緊急搶救階段灌漿完成後，地表沉陷已穩定，分別使用低頻電磁波探勘儀 (SYT)、低頻電磁波探勘儀 (DGT) 進行調查。由 SYT 工程探測儀在靠近圍牆的橫剖面中 (圖 14)，可顯示出疑似圍牆角落的沉陷區寬度約 11 m，沉陷深度約 12 m。由圖 9 中可明確的判釋出疑似沉陷區幾何形狀，周圍為高電阻值 (藍至紅色)，疑似沉陷區為中低電阻 (綠至咖啡色)，代表灌漿已改善沉陷區，但仍然含水多尤其在地表至下約 3.5 m 處。

由 DGT 工程探測儀 (垂直解析度 10 cm)，所得結果可知，由視電阻率判釋出管線位置，剖面圖中除可提供管線的資訊，也能夠分辨出區域性的地質狀況，但並不能代表為整體的地下質狀況。由圖 15 以及本次的另外 4 條剖面中，可明確區分出地下有四層較為堅硬的物質 (紅色的高電阻值) 存在。

為確認第二階段重建工程施工時，環河北路地盤改良施作之必要性，特別安排以低頻電磁波探勘儀 (DGT) 進行補充調查，DGT 探測之測線東西向二條

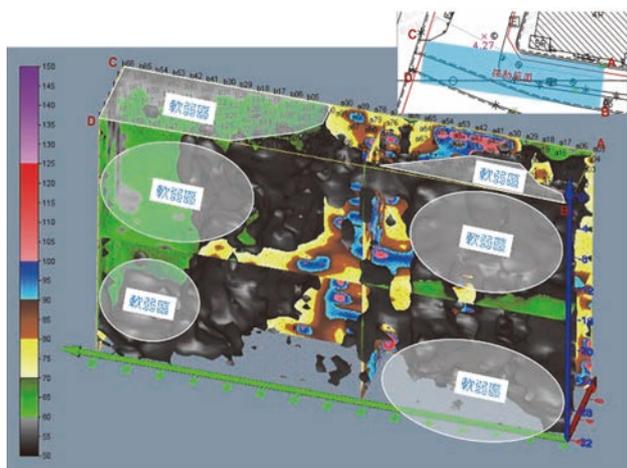


圖 13 灌漿階段 SYT 探測成果 (106.12.16)

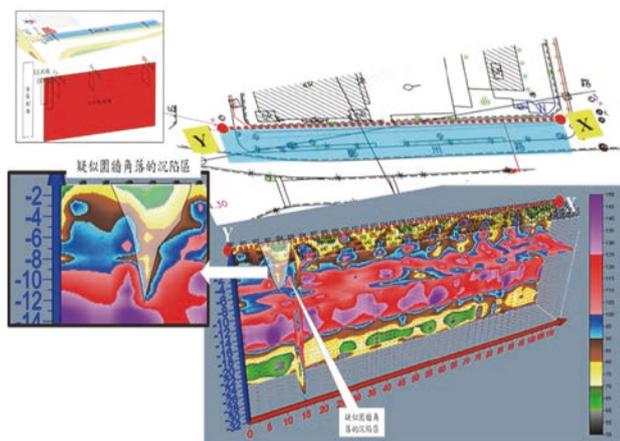


圖 14 人行道 SYT 探測成果 (106.12.20)

測線包含 GG、HH。由地表下 10 m 以上局部區域視電阻率為 70 以下得知，顯示該局部區域較為鬆散，含水量高。依 DGT 判釋成果，部分管線可依管線圖區分出來，部分無法判別者可能是地盤改良之目標範圍。

事故原因探討

工址地層經參考鄰近工程資料得知，地層之分佈情形屬砂粘土互層，地表回填層下方有一層粉質黏土，平均厚度約為 2 m 左右。其下為粉質細砂，偶夾小礫石，平均厚度約為 10 m 左右。工址範圍之工程性質主要為砂土所控制。因此，一旦地層有沖刷掏空情況發生，沉陷槽將快速傳遞至地表，並於地表道路、人行道產生立即沉陷。經檢視相關透地雷達、低頻電磁波之調查結果，與現場排水箱涵破損、實際灌漿數量研判，初步可將事故原因歸納為下面三點：

1. 本事故發生初期，除發現路面、人行道掏空下陷外，經現場排水箱涵發現側牆及底板有缺口、破損情況。其中底板破損可能是下方掏空所致，而靠近共管通風井旁 0k + 5.5R 位置之側牆缺口，經檢視發現外側土壤皆已遭沖刷形成抽坍孔洞。後續亦直接以灌漿方式回填 185m³ 之混凝土。

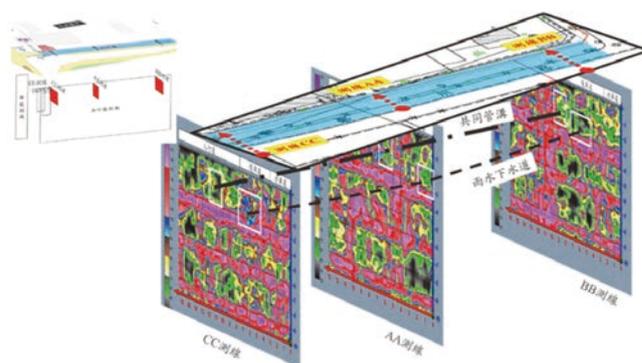


圖 15 管溝位態 DGT 探測成果 (106.12.20)

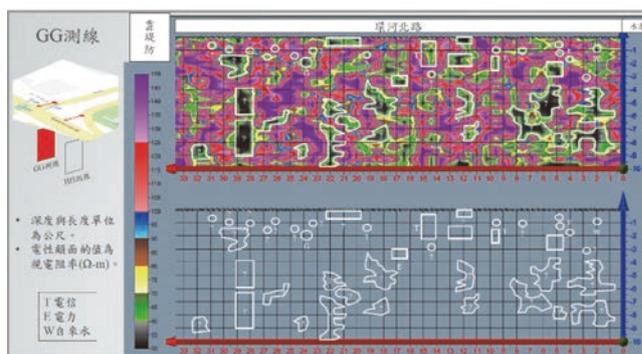


圖 16 GG 測線 DGT 探測成果

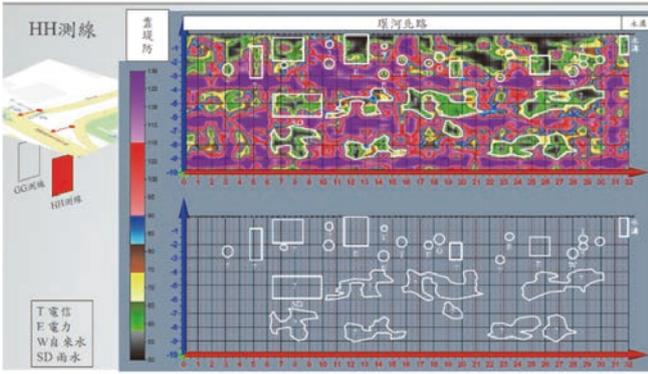


圖 17 HH 測線 DGT 探測成果

2. 參考事故發生當日，低頻電波之探測成果，鄰近事故區之 700 mm 污水管上方地下孔隙相當發達（圖 12）。除地表回填混凝土 27 m³ 外，於後續第一、二階段，於此位置之灌漿，灌漿部分共灌注水泥約 4,000 包。此街口位置除 GL-7 ~ -9 m 範圍之 700 mm 污水管已知有脫管並遭灌漿阻塞外，下方 GL-16 ~ -19 m 範圍亦有 2,400 mm 污水管，亦不排除有破損掏空現象。
3. 本工址範圍鄰近淡水河，且地表下 12 m 範圍內多為砂土，長期受潮汐影響可能導致管線下方多有土壤鬆弛現象。因環河北路及鄭州路上管線密布，該土壤鬆弛帶並未發展至地表道路。但可能於地表下產生局部較疏鬆之排水通道，參見圖 15 黃綠色部分。長期而言，可能造成較大區域之平緩沉陷，惟若伴隨其他事故原因，將導致事故區域之沉陷量加大。

精進作為與展望

案址排水系統屬感潮段，在辦理雨水箱涵緊急搶修與重建過程中，需動員各單位密切聯繫及配合，觀察潮汐漲退情形適時操作抽水站閘門，盡量降低箱涵內水

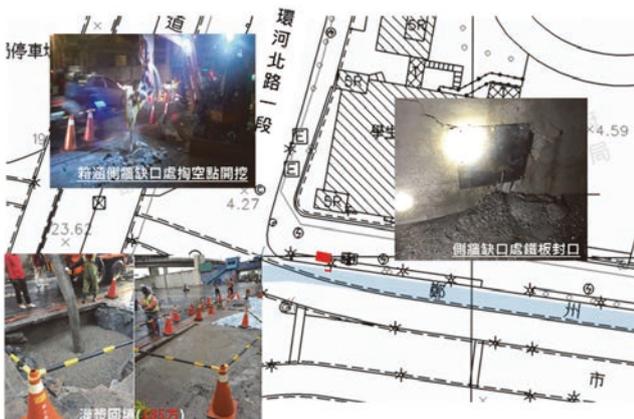


圖 18 箱涵側牆缺口處理示意圖

位以利增加施工時間及確保施工人員安全，施工現場需設置前進指揮所，現場指揮官應注意工地狀況及作適當的處理，以即時解決工地問題並達成提早完成箱涵重建恢復通車。本事故搶修已經告一段落，透過再次檢視過程、研提精進作為以減少類似案件再次發生之機率，爰將本案例搶救經驗及檢討、精進作為整理如下：

1. 地下探測技術之運用：傳統透地雷達於地下探勘，係考量其探勘速度快、解析度高等特性，但卻有無法穿透較深層地層、遮蔽效應與干擾等影響探測效果之限制；而低頻電磁波解析度中高、探測速度較慢，惟其可探測至深層。本案例於執行過程中，導入兩種非破壞性探測技術，於初期利用透地雷達進行地球物理調查，以快速探查淺層地層異常區域分佈狀況外，另針對工址較深層之空隙調查，則採低頻電磁波進行調查，探測時間點包括沉陷發生、灌漿中及灌漿後，藉此作為改善方案研擬、施工改善效果等各階段作業參考依據。
2. 落實定期縱走調查：為掌握雨水下水道結構情形並作必要之維護與改善，需定期辦理縱走調查，管徑較大之排水系統一般係以人員縱走方式進行調查，管徑較小者可採用 TV 檢視車（圖 19），俾利及早發現排水系統缺失並納入後續結構補強作業，惟於執行排水系統縱走調查作業時，常因雨水人孔降埋、或因受潮影響積水過深致人員難以進入調查，造成管理維護的盲點。故針對過去縱走調查遭遇困難部分應成立專案縱走調查計畫，投入跨單位資源將前述阻礙調查因素排除，以確實掌握箱涵狀況。
3. 人孔下地政策之省思：臺北市已多年獲選為路平績優單位，路平管制與人孔降埋是提高行車安全及舒適度的重要策略。惟排水系統有維護與清疏需求，雨水人孔的適地及適量提升，應可再平衡檢討。為兼顧行車安全，臺北市已推動圓形切割人孔（圖 20）提升，可有效改善以往方形切割人孔對路面造成的裂化及安全的影響，另採用防氣掀式雨水人孔（圖 21），可避免人孔彈跳的風險，這些精進作法可作為後續人孔提升與降埋時之通盤考量。人孔適地適量提升後，即可廢續辦理排水系統縱走調查與後續維護改善作業，以期掌握問題並及早改善。
4. 管線圖資掌握之重要性：過往地下管線圖資常見問題為資料正確性較為欠缺或散見於各管線單位難以即時整合，鑑此，臺北市已成立「臺北市道路管線



圖 19 小管徑排水系統 TV 檢視車與成果示意圖



圖 20 圓形切割雨水人孔圖



圖 21 防氣掀式雨水人孔圖

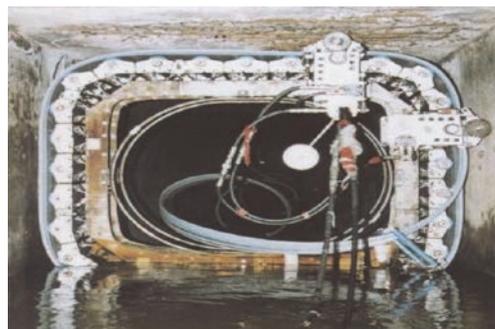


圖 22 自走式旋轉製管示意圖

使用之環帶均由 PE 製成，且板帶之表面具有公母卡榫設計，藉由製管機將環帶旋轉於舊管內成新管，環帶與舊管內壁之間還必須灌注水泥砂漿。

由於不同管徑環帶厚度為固定，管徑

大小與灌漿厚度可以由製管機直接調整，因此本工法管材不需根據現場條件生產，未來或可思考利用於緊急搶救作業。

由於國內運用免開挖更生工法於雨水下水道之案例較為欠缺，爰臺北市亦將於 107 年另案推動試辦，運用旋轉環帶製管工法於結構修補工作。

結語

古人有云：「前事不忘，後事之師。」本文以鄭州路、環河北路口事故為例，應用透地雷達與低頻電磁波等非破壞性探勘技術作為搶災及重建之輔助決策參考依據，獲得不錯成效，成功協助搶災及箱涵重建工作順利進行，將道路影響降至最低。

另透過本案例地下排水箱涵結構嚴重破損之緊急處置、重建過程分享及精進作為探討，期能提供工程界處理類似案件之參考。

參考文獻

1. 臺北市政府工務局水利工程處 (2017)，「鄭州路環河北路口排水箱涵緊急搶修重建工程大事紀」。
2. 台灣世曦工程顧問有限公司 (2017)，「排水箱涵復舊施工構想簡報」。
3. 台灣世曦工程顧問有限公司 (2018)，「環河北路與鄭州路口箱涵事故成因檢討報告」。
4. 朱子豪、翁志傑 (2018)，「非破壞式探勘技術應用於人為結構物及地下管線」。
5. 陳逸群、上垣潔志、張俊郎 (2011)，「PALTEM・Flow-Ring 中、大管徑免開挖更生工法之發展及應用」，地下管道 24 期，第 29-36 頁。

暨資訊中心」，整合各管線單位之 3D 圖資，本次事故發生後，透過道管中心各管線單位駐點人員的聯繫，在極短時間內將事故地點周邊管線單位會集釐清，迅速掌握地下管線情形，以做為事故原因研判及搶修施工之參考。

5. 結構修補工法之精進：本案例之箱涵復舊工作係採用明挖工法，惟該工法對交通衝擊甚大，未來除傳統工法外，宜引進其它維生管道之修復工法，例如採免開挖更生工法 (No-Dig Renewal Method) 於國外已是成熟的技術，在臺灣下水道與自來水管線的應用亦有不少案例，免開挖更生工法種類繁多，較為國內所採用的主要為現地成形固化工法 (Cured-In-Place Pipe；CIPP) 及旋轉環帶製管工法 (Spiral Pipe Renewal；SPR)。

現地成形固化工法 (CIPP) 為國內實際運用較多的工法，主要施作方式分為氣壓反轉、水壓反轉兩種，前者輕巧靈便，後者則反轉能量較大，但兩者管材都必須根據舊管之損壞情況及載重條件計算內襯所需厚度，預先製成軟管，並於工廠進行樹脂含浸 (Impregnation) 加工後，才能於施工現場進行反轉及加溫固化作業；因此，現地成形固化工法之內襯軟管所需備料時間較長，並不適用於搶救作業。

旋轉環帶製管工法 (SPR) 主要施作方式分為元押式旋轉製管、自走式旋轉製管兩種，元押式旋轉製管一般適用於既設管徑 250 mm ~ 1500 mm，自走式旋轉製管適用於 900 mm ~ 5000 mm (參見圖 22)，兩者所