

下水道管線掃瞄與狀況評估技術

謝啟萬¹、李昭明²、謝明紋³、何昱賢³、林千貴³

摘要

正確評估下水道管線之狀況為規劃設計經濟有效管線更新(修繕或替換)計畫之重要因素,管線更新通常多依現場技術人員評估管線之狀況而定,建立標準化管線狀況評估系統已討論了近三十年,然而目前本國仍未建立此標準評估系統。

由於傳統 CCTV 管線檢視技術成效掌控在操作之技巧、經驗與敏感度而使 CCTV 管線狀況評估系統與人關係密切,於操作過程中操作者需於極短的時間內完成現場判定與準確之分類、評定缺失等級及給予符號,因此操作者通常於執行過程中一直處於壓力狀態以保持最佳工作進度及良好評估結果。有時操作者考量各種因素於某種妥協之情形下所做之決定,最後可能造成較高價碼之施工成本。

目前常採用之影像技術共有三種,其中包括音波影像(acoustic imaging)、電磁波影像(electrical imaging)及光學影像(optical imaging)等技術。本文討論之技術簡稱為下水道掃瞄及評估技術(Sewer Scanner and Evaluation Technology / SSET)。

SSET 管線評估系統乃由油氣工業界所應用之地質影像處理技術所衍生出的新技術,而此項技術之主要特性為採用高解析度數位化魚眼掃瞄儀可連續及全斷面之方式掃瞄管線內部,掃瞄之結果不但可以高解析度數位化資料方式儲存與分析,並且亦可將掃瞄結果以平面方式展開以利觀查與研判。本文將簡介該系統之發展背景、原理及應用成效,更而期望該系統得以引進協助地下管道主管機關執行管線之管理工作。

一、前言

正確評估下水道管線之狀況為規劃設計經濟有效管線更新(修繕或替換)計畫之重要因素,管線更新通常多依現場技術人員評估管線之狀況而定,建立標準化管線狀況評估系統已討論了近三十年,然而於世界各地區仍未建立此標準評估系統。本文將回顧傳統管線狀況評估之技術,及探討光學掃瞄技術應用於下水道狀況檢測之發展情形,該項技術簡稱為下水道掃瞄及評估技術(Sewer Scanner and Evaluation Technology / SSET)。目前此項技術已經由美國土木工程研究基金會(Civil Engineering Research Foundation / CERF)與美國 13 個都會區下水道主管機關贊助下進行評估,並於 1999 年與美國亞特蘭大市簽定商業合約進行第一個試驗性管線評估計畫。本文亦將該兩項計劃應用 SSET 技術之成效提出討論。

二、發展背景

目前研發之管線狀況調整與分析技術乃由油氣工業界所應用之地質影像處理技術所衍生出的新技術,目前常採用之影像技術共有三種,其中包括音波影像(acoustic imaging)、

電磁波影像(electrical imaging)及光學影像(optical imaging)等技術。而此項技術之主要特性為將掃描管線內部之影像資料以平面方式展開,以便將過去傳統評估系統無法提供之條件顯示出。

音波影像技術亦可稱為音波鑽孔電視顯示器(acoustic borehole televiewer),為 Mobil 油公司最先研發此類音波鑽孔影像檢視技術,此項技術之目的在於偵測岩盤之裂縫,於 1970 年代初期,Simplex 公司利用 Mobil 公司擁有專利之技術製造出第一代該項技術之儀器,而於 1980 年代末期所有油氣工業公司均已研製數位式鑽孔電視顯示器(digital borehole televiewers)。該項設施均基於相同之原理,由轉換器發射之短暫音波能量,再透過鑽孔內液體部份由鑽孔壁反彈回來,而經由此項過程之檢視則可包含 360° 全方位。

1985 年 Schlumberge 將一系列感應器裝設於墊板內使其具有記錄微阻抗之能力,而此項資料則為研發電子影像之基本數據。最初此項儀器包含二個成型微掃描器(FMS, Formation Microscanner)之墊板,而後由二墊板之 FMS 改進為具四手臂四墊板之儀器,於 1993 年,Halliburton 研製六臂六墊板微阻抗儀器,隨後 Western Atlas 公司將此六墊板微阻抗儀器與其公司之音波影像儀器合併使用,而目前最新之電子影像儀則包含一個四臂八墊板之元件,簡稱為全方位鑽孔成型微影像儀(FMI, Fullbore Formation Microimager)。

1. 國立屏東科技大學土木工程系副教授
2. 競督環境工程股份有限公司總經理
3. 國立屏東科技大學土木工程系研究生

光波影像技術利用鑽孔照相機為最早鑽孔影像處理儀器，最初該項儀器乃將立體鏡照相機安裝於一種膨脹球上，該系統之鏡頭前方打氣形成之透明液態氣泡。CCTV 於 1960 年代引進於下水道管線內部之檢視，以替代採用鏡片反射置於管線內部光源所形成之管線內部影像，由於美國環保署 (EPA) 編定之營建補助計畫中要求將標準調查技術應用於管線系統評估調查 (Sewer System Evaluation Survey / SSES) 工作中，因此造成 CCTV 系統於 1970 年代起廣泛被應用及成為管線評估技術之標準。而 CCTV 技術及下水道資料輸入及管理系統由 1970 年代起已有長足之進步，其由放置於滑輪上之黑白攝影機與手控收集資料及管理系統並不斷行進，而於 1980 年代末期，一種可旋轉光學影像系統研發應市。於 1990 年代初期，光學影像技術行進至包含一數位化相機裝配於一錐狀鏡片與環狀照明燈之前方，而於 1990 年代中期，此項技術則精進採用雙曲面鏡頭，照相機可由放入鑽孔過程中連續記錄鑽孔壁之狀況，而於每 0.5 mm 縱向間距，可將鏡頭反射之資料數位化，該儀器需配置環形偵測頭以便偵測鑽孔壁，而此環狀偵測頭可將鑽孔 360 度方位資訊展開。

由於此項技術成效掌控在操作之技巧、經驗與敏感度而使 CCTV 管線狀況評估系統與人關係密切，於操作過程中操作者需於極短的時間內完成現場判定與準確之分類、評定缺失等級及給予符號，因此操作者通常於執行過程中一直處於壓力狀態以保持最佳工作進度及良好評估結果。有時操作者考量各種因素於某種妥協之情形下所做之決定，最後可能造成較高價碼之施工成本。例如，某項重要下水道改善工程由於 CCTV 操作檢視管線過於快速而將 92 處管線缺陷處忽略，而於後續施工中由修復廠商發現，進而影響工程施工價格與進度。

三、SSET 評估技術

目前音波、電波及光波影像處理技術均有應用於管線狀況評估之實例，然而光學掃描技術對下水道檢視則最具有潛力可提供最佳效果，於下將更詳細討論應用此項技術研發之管線評估系統，而此評估系統簡稱為下水道掃描與評估技術 (SSET, Sewer Scanner and Evaluation Technology)。

該項技術乃由美國學者與儀器公司共同進行研究採用先進光學掃描/影像技術以完成管線評估系統 (SSET) 之研發，第一代 SSET 系統於 1998 年九月研發完成，該系統採用魚眼相機以替代旋轉式掃描器，並採用光纖迴轉儀以替代機械式定位儀。第二代 SSET 系統於 1998 年 11 月宣布研發完成，並於 1999 年五月於美國 Santa Rosa 市進行測試，檢測約 6,000 公尺之管線，其尺寸由 200mm 至 600mm，由此次試驗證實第二代

SSET 系統足以應用於廣泛之下水道系統，此項系統之研發過程中美國免開挖技術研究中心 (Trenchless Technology Center TTC) 精確地記載其表現結果及其需求改善方向以做為發展此項技術之參考。

四、SSET 評估過程

管線評估系統包括二個階段，第一階段為資料收集 (data acquisition)，而第二階段則為資料評估分析。當一項技術需仰靠操作者對現場資料之攝取、比較與分類，因此操作者對下水道系統修繕與維護及損壞機制之預估，與其品質、可靠度及成本均影響重大，而美國各城市主管機構對管線狀況分級差異甚大，在某次調查中被判定為裂紋之情況可能於另一次調查中則判定為三級裂縫，此乃因為調查分類執行缺乏一貫性而不能符合工程評估調查之需求，而常造成重複執行及更高費用之評估調查工作。

不論採用任何過程，如輸入錯誤資料可想而知將產生錯誤結果，傳統檢視工作通常為某家顧問機構由主管機關獲得承包合約後，再將 CCTV 工作下包給專業廠商，此分承包合約應提供 CCTV 檢視影帶及管線損壞之分類報告，由於不同技術人員對同一管線狀況之分類結果可能差異甚大，因此目前許多顧問機構漸趨向於不希望其 CCTV 承包商對管線之損壞狀況進行分類或說明，而只要求其技術人員只需收集錄影帶資料，再由顧問機構之工程師進行管線狀況分析與分類工作。

1996 年美國 NASSCO 執行主任曾強調操作者通常盡可能以最快之速度將 CCTV 相機穿越管線內部以收集資料，因此如何改進收集資料之技術對資料收集與後續分析將更為有效，或可以說，如 CCTV 收集資料經由操作者進行，不論收集資料採由人為或藉助軟體執行，管線之檢測均不可能十分有效，因此收集可靠之資料以利有效的後續分析為誘發研發 SSET 系統之動機，而需求更快更好之決策機制則為研發 SSET 之原動力。

此種評估系統與傳統 CCTV 檢視大致有數種相同點，此二系統均包含二階段過程，並且均需採用相機或偵測器行經於管線中以收集資料，二者均需採用交通工具將系統載運至工作地點，二者使用之工作人員大致相同。

第一代 SSET 系統之檢測儀包括三部份，在檢測儀之前方配備一 CCTV 做為收集資料之用；配備一個機械式光學掃描器，採用二個掃描鏡將管壁情形經由燈光照射反射至它端之光學感應器上，並將資料轉換為全色彩之數位資料；第三部份則為機械式定位儀。

該檢測儀於 360 度轉向可接收 500 資料點，鏡頭每秒可旋轉 54 次，當檢測儀於管線中

行走，掃描線則被延展開，其於縱向之解析度決定於其行走速度，該儀器於檢測時均以均勻速度行經管線內，且不需於管線損壞處停止，第一代之儀器其平均前進速率為 0.4 公尺/分鐘，而最高速率為 7 公尺/分鐘，此為不含缺陷處新管線之檢視速率，但隨管線破壞情況增加，其檢視速率將大幅降低，其速率與管線缺陷處數目有關，因為必須停機以確實評估管線情形，而其檢視速率之變化性亦可能不同。

但 SSET 系統檢視時則不需於管線破損處停機，不論管線破損之情形均以一均勻速率進行評估。

而第二代 SSET 系統之檢測儀則更短更快，沒有行走零件，並採用魚眼鏡頭及 VGA 感應器以攝取影像資料。採用之探測儀於每掃描轉向可收集 200 資料點，並且由機械式定位儀升級為光纖定位儀，該系統並採用 Window 98 系統操控。

於第一階段於現場收集資料過程中，當探測儀於管線行走中操作者可監控 360 度展開之管線狀況，以確保儀器正常操作，並注意任何可能造成問題之特殊狀況，例如崩孔等。掃描及轉換之資料並自動讀錄於磁碟機中。

SSET 系統第二階段之工作不需花費巨多時間進行管線狀況之研判，只需將現場收集之資料輸入分析軟體中，並將管線眾多資料輸出，該軟體可提供之資料包括：

- 前視資料
- 管線全長全周圍之掃描影像，
- 沿線每一損壞處之說明，
- 水平向管線位移量，
- 垂直向管線位移量，

此項系統分析結果可應用於準確的量測與統計分析管線狀況，所有之映像資料可以儲存於光碟中供後續讀取與評估分析之用。

CERF SSET 評估計畫

為評估 SSET 管線狀況評估系統之功能與實用性，該系統之研發者 Iseley 博士曾出函邀請全美各都會區下水道主管機關共同邀請參與該系統之評估工作，而獲得美國土木工程研究基金會(CERF)與十三個都會區主管機關之支援及美國免開挖技術研究中心(Trenchless technology Center, TTC)擔任顧問共同進行第一代 SSET 系統之評估工作，支持此計畫的 13 個都會區下水道主管機關共支付約 20,000 美金經費以執行此計畫，除了金錢上支援外另外每一都會主管機關又支付 2000 美元以利執行第二代 SSET 系統應用於 Santa Rosa 市之工作，如果將直接與間接成本共同納入，此項計畫總金額超過 40,000 美元。

那麼多主管機關對此項新管線評估技術抱持高度興趣，明顯的，參與此項管線評估技術

之主管機關均明白評準確估技術之重要性，經過適度調查後，瞭解採用數據數位化功能之先進技術足以協助決定快速正確之決策，而 SSET 系統之評估標準乃由此 13 個都會區主管機關評估者針對：施工度實務可行性、功能上之表現、修護之可行性、安全性、環境的特性等因素而訂定。

由於檢視收集大量之數據，只選擇有限數目之管段掃描資料進行完整比對分析，而此比對分析包括如下數個項目：

1. 準確性---斷定管線破損是否為正確？判定破損的位置是否正確？迴轉儀收集資料是否可靠？
2. 勝任性---是否掃描儀較 CCTV 系統判定出更多或更少之破損處？
3. 品質---掃描儀之精度、色彩解析度、及高程精準度為何？

而此項分析之目標將著重下列所示之破損形式：

1. 裂縫---包括縱向、環向、螺旋狀或是複合型式。
2. 區域性破損---包括結構性、腐蝕性、入滲、根部貫入、及碎片等。
3. 側向破損---包括製造過程引起的插入式或擠出式。
4. 接頭損壞---包括錯開式或分離等情況。
5. 垂直性變位---高於或低於設計之高程。

亞特蘭大市 SSET 評估計畫

1999 年 7 月 29 日美國區域性法庭、及亞特蘭大市與聯邦環境主管機構達成一項全面性協議，同意在未來十四年內評估與提升該城市污水收集處理系統，此項收集系統將包括 3500 公里老舊污水管線，此項協議要求所有污水管線及部分私人管線需要檢視，並估計衛生下水道管線之檢視與評估需耗時二年，並估計約有 50 % 收集管線需要升級，當此計畫完成將使亞特蘭大下水道系統之水準提升與德州休士頓市、邁阿密市及傑佛遜市共同媲美。

而改善亞特蘭大市污水收集系統改善計畫中主要部分乃為經由管線狀況評估計畫以達成，而其重點則在於如不能準確的評估管線狀況則無法選擇最佳方案以解決管線不良之情形。當管線狀況評估不正確或不完整，則修繕技術之指定則可能不適當或是花費更多經費達成修繕之目的，並且不正確管線評估結果常造成修復廠商於施工中發現合約中未註明之損壞處而導致變更施工計畫並付出更昂貴之施工費用。

亞特蘭大市如同大部分都會區，需要選擇目前市面上最佳之技術以評估及更新其損

壞污水系統，由 CERF-SSET 評估計畫之初步評估結果得知 SSET 系統實用性良好，於是決定採用此項技術執行第一個商業性前導 SSET 評估計畫，該計畫將掃瞄及分析亞特蘭大近 6,000 公尺之污水管線，管線尺寸由 200mm 至 600mm，應用結果良好。

五、 結論與建議

採用 SSET 系統檢測管線內部狀況之技術已經由科學及商業方法驗證該項技術具有許多優點，經由現地試驗證明足以解決以往不正常之處理方式，而於 CERF/TTC 之報告中將有詳細說明採用第二代 SSET 系統解決許多不當結果或得以免除或降低，並提供部分修正建議。SSET 評估系統對維護、修復、及更新下水道收集系統之下水道管線工業界非常重要。

然而此系統仍需整合 CERF/TTC 及亞特蘭大試驗計畫之心得以便推動更完整之研究及發展克服既有之缺失，而將高解析度之數位化光學電視(OPTV)技術應用於管線內外狀況之評估。更期望本國得以引進該項技術協助各地下水道主管機關執行地下管線之管理工作。

六、 參考文獻

- GeoMechancis International, Inc. (GMI), "Acoustic, Electrical, and Optical Wellbore Image Analysis: Applications for the Geotechnical Industry," Training materials presented to OYO Corporation, Tsukuba, Japan, December 16&17, 1999 by GMI, Palo Alto, CA.
- Robertson Geologging, "RG Optical Televiewer Probe (OPTV): High Resolution Fracture Imaging System," Promotional Literature, Deganwy, Conwy, UK, 1999
- CERF (Civil Engineering Research Foundation), "Evaluation of SSET: The Sewer Scanner & Evaluation Technology," A Technical Evaluation Report prepared by CEITEC (Civil Engineering Innovative Technology Evaluation Center)-a service center of CERF, the research affiliate of ASCE (American Society of Civil Engineers), Washington, DC, 2000.
- Montgomery Watson, "Sewer Condition Classification Manual," Prepared for the City of Baton Rouge, Parish of East Baton Rouge, Sewer Evaluation and Rehabilitation Program, Montgomery Watson, Baton Rouge, LA, June 1999.
- Thomas, Alan, "U.S. Rehabilitation Projects TV Inspection and Data Evaluation," No-Dig International magazine of the International Society for Trenchless Technology (ISTT), London, England, August 1996.
- ENR, "Atlanta Must Upgrade Sewers," the Water Quality section, p. 14, ENR magazine, August 16, 1999.
- Peters, David; Iseley, Tom; McCullouch, Bob; and Ingram, Leonard, "Sewer Pipeline Condition Assessment: The City of Atlanta SSET Pilot Program," No-Dig Engineering, Vol. 6, NO. 2, pp.18-21, 2nd, 3rd&4th Quarter 1999.
- Hassey, Patrick, Underground Construction and Maintenance Manager, County of Sacramento, Public Works Agency, Water Quality Division Memorandum "Memorandum to Scott Edwards, CERF," RE: Concerns Regarding Status of SSET Project, January 21, 1999.