

# PCCP 管線渦電流檢測實務應用探討

\*陳瑋珣、\*\*汪嘉誠

\*一級工程員、\*\*三級工程師

臺北自來水事業處工程總隊

## 摘要

自來水供水系統係與都市建設發展同步，主要幹管多屬早期建置埋設，一般而言管徑愈大其施設之時間愈早，故大口徑之自來水管管齡普遍老舊。臺北自來水事業處(以下簡稱北水處)擔負大臺北地區自來水供輸的任務，而臺北地區地狹人稠交通量頻繁，任何一條幹管發生損害或滲漏，不僅可能造成大範圍地區、長時間的停水、交通阻塞，甚而導致路面塌陷、人員傷亡之重大意外事故；因此，需針對災害高潛勢區、輸水安全有疑慮的主幹管線，事先進行系統性的安全評估、補強、分散風險或損害防阻等措施，確保供水安全。為此，北水處配合推動自來水設施整備計畫，除針對轄內老舊之中大口徑自來水幹管逐年進行全面檢修、維護及汰換，並於臺北地區創新採用渦電流非破壞檢測技術、目視檢視及敲擊聽音等方式，對管齡較久的鋼襯預力混凝土管線(PCCP)進行安全檢查及作業，以檢測預力鋼線是否有異常情形，俾利早期發現並予以補強。

本文以北投幹線(北投加壓站~雙溪橋前)φ1500mm 鋼襯預力混凝土管線(PCCP

檢測委託專業服務案例(下稱本案)，介紹 PCCP 管線渦電流非破壞檢測必須考量之因素及本案實質作業內容，作為未來該類工程實務應用之參考及依據。

## 一、前言

北水處北投幹線於民國 77 年完工通水迄今已逾 31 年，全線送水管材齡已趨老舊，其中位於北投加壓站~雙溪橋前φ1500mm 送水管，其材質除部分 DIP 管外，主要為鋼襯預力混凝土管(PCCP)，總長約 2,342m，其中 PCCP 約 2,150m。相較於延性鑄鐵管，PCCP 管強度及耐震性能較差，風險較高，故配合供水調配期程，於既有年度通案工程辦理停水檢視清洗時，同時辦理 PCCP 非破壞性檢測委託專業服務案，以檢測預力鋼線斷裂異常情形，並撰寫分析報告研擬後續補強方式。

## 二、渦電流檢測基本原理

渦電流檢測是一種非破壞電磁檢測方法(簡稱 EM)，用於評估預力鋼襯混凝土管(PCCP)的預力鋼線的安全狀況，通過在預力鋼線中感應產生電場，測量電場感

應預力鋼線產生的磁場。本案受委託廠商橋豐公司(以下簡稱廠商)係採用加拿大Pure公司 PipeWalker 設備，渦電流處理器即時輸出的資訊，為其偵測器通過管線所獲得回應的時域圖，圖表的長軸代表時間，振幅則代表(+/-)直流伏特。因跨越距離受到磁場被線圈擾亂的限制，當線圈較長時，如 PCCP 管段，擾動的現象將隨線圈(管段)長度而漸減，將產生波形如圖 1(正常波形)。

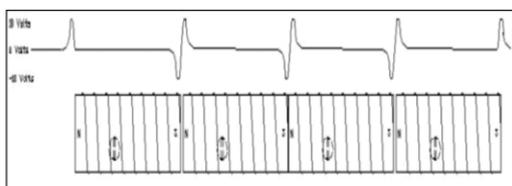


圖 1 隨線圈長度而漸減之波形圖

根據採集每段管段的磁場信號，識別因鋼線斷裂區域引起的異常信號，如圖 2。異常信號的各種參數(波長、波幅和相位偏移等)透過評價與異常相關的各種特性(例如長度、幅度及相位偏移等)，推估斷線數量。該檢測方法能夠量化斷線數量，可進行評估管線安全狀態。

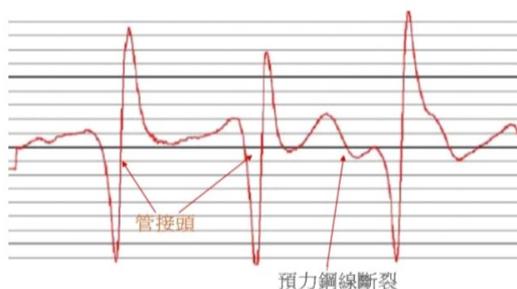


圖 2 異常信號

預力鋼線以螺旋方式纏繞於 PCCP 管內，感應電流於管體鋼線內產生磁場，鋼線斷裂處將造成磁場的不規則現象，PipeWalker 藉此接收訊號並定位異常點，如圖 3。

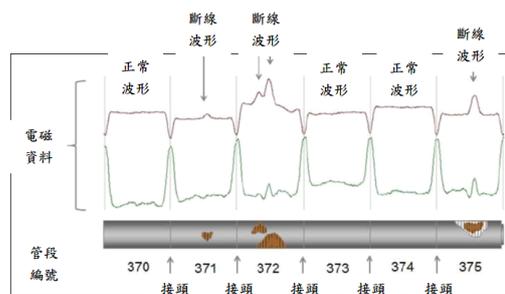


圖 3 電磁信號與管線狀況比對說明圖

### 三、檢測設備組成

本案檢測設備主要包括驅動器、接收器，相關設備規格、一般技術要求、電源規格及檢測參數說明如下：

#### (一) 驅動器：

在 PipeWalker 設備中，包含一組螺旋線圈用以產生驅動力場，假如線圈被置於管線的中間點(或起拱線)，等同於在管線的上半部與下半部產生電流，此時並無磁場產生。當驅動線圈輕微上升或下降時電場無法平衡，於是在預力鋼線中產生磁場變化。

#### (二) 接收器：

接收器是由另一組線圈組合，沿線圈的口徑透過一條來自驅動器軸向的

線，確定驅動力場所產生的電通量對接收器是平衡的，為零輸入。但假如接收器被置於靠近管壁處，那所有的磁場均可被偵測。PipeWalker 處理器可對磁場的極性、強度、時間直接進行量測並過濾部份無變化的磁場，檢測設備如圖 4。



圖 4 檢測設備

(三)設備規格如表 1 所示：

表 1 檢測設備規格表

重量	最小 82kg、最大 102kg
裝配尺寸 (高 x 長 x 寬)	最小 1m x 1.8m x 1.1m 最大 1m x 1.8m x 3.2m
最小進出口 尺寸	很容易通過直徑 600mm 的人孔 可通過最小 406mm 的人孔

(四)一般技術要求如表 2 所示：

表 2 一般技術要求表

溫度	0 - 45°C
濕度	相對濕度 0-100%
水深	水深最多不能超過 30cm
坡度	無限制，如坡度超過 20%，根據實際的管線狀況，可能需要用到牽引繩。
彎管	如遇到急轉彎頭，設備可能需要拆解。

(五)電源規格:連續工作 10 小時以上的 12V 可充電電池。

(六)檢測相關之參數如表 3 所示：

表 3 檢測相關參數表

設備類型	人工推行 PipeWalker 設備
人員要求	3 人在管線內操作設備、記錄檢測情況及管線編號，其他人在地面提供支援
設備組裝時間	約 20-45 分鐘，取決於管徑及其他實際情況
線圈類型	可安裝在 Pure 公司各種電磁設備上的發射線圈及接收線圈
行走速度	0.5-1m/s
每天所能檢測長度	每天約 5-10 公里(直管)，取決於管線狀況和坡度等
管徑	DN1200-DN4000
管線類型	PCCP、PCSP 等預力管線

(七) 影響讀數及成果的因素：

磁場相關變化非常微小，其他影響量測或誤判其損壞大小及重要性等干擾因素如下：

1. 設備移動造成衝擊，管內表面不平及振動造成雜訊。
2. 管線接頭鬆脫，接頭部分會顯現與密合接頭不同的狀態。
3. 管內預力鋼線直徑改變。
4. 管內預力鋼線箍螺紋距改變。
5. 管內預力鋼線與內層距離改變。
6. 內襯層厚度。
7. 埋設土壤周圍有金屬物。

#### 四、預力鋼線斷損情形判斷依據、診斷標準及損害等級

##### (一)預力鋼線斷損判斷依據

判斷依據接收信號的振幅及其相位，建立分析曲線與檢測曲線，檢測曲線建立基礎除現場渦電流檢測紀錄，還需與工程師不斷溝通、討論並得到所有能提供之相關資料，應用各種判讀分析之計算方法得到最後結果，檢測波形如圖 5。

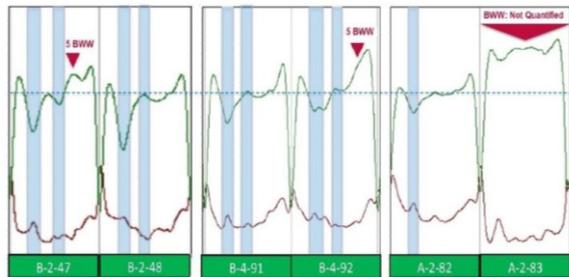


圖 5 斷線管道檢測波形圖

##### (二)預力鋼線斷損損害等級

鋼線斷線數量檢測結果完成後，廠商參考國外眾多檢測案例經驗，將每支 PCCP 管(5M 長度)檢測出之斷線合計數量以顏色區分警戒等級，如 5 根(含)斷線內以綠色標註(安全等級)，6~15 根斷線內以黃色標註(警戒等級)，15 根以上斷線以紅色標註(危險等級)。以上所提分類結果為每支 PCCP 管相對比較後之警戒分級，尚待進一步探討後作為後續執行參考。

#### 五、北投幹線(北投加壓站~雙溪橋前) φ1500mm 鋼襯預力混凝土管線

#### (PCCP) 檢測委託專業服務案例 檢測成果

##### (一)檢測管線現況資料

本案採用渦電流檢測北投幹線之北投加壓站~雙溪橋前範圍內的自來水送水管，管道類型為φ1500mm 的埋入型鋼襯預力混凝土管(PCCP)，管材係由○○水泥製品有限公司於 1987 年生產製造，北水處負責營運管理，表 4 為 PCCP 管材結構參數、圖 6 為 PCCP 管結構圖。

表 4 PCCP 管材結構參數

序號	項目	單位	尺寸	
1	管道內徑	mm	1500	
2	鋼襯外徑	mm	1589.2	
3	原管厚度	mm	87.7	
4	鋼襯鋼板厚度	mm	1.5	
5	高強鋼線線徑	內壓 14 kgf/cm <sup>2</sup>	mm	3.2
6	鋼線間距	mm	8.2	
7	高強鋼線層數	層	1	
8	砂漿淨保護層厚度	mm	25	

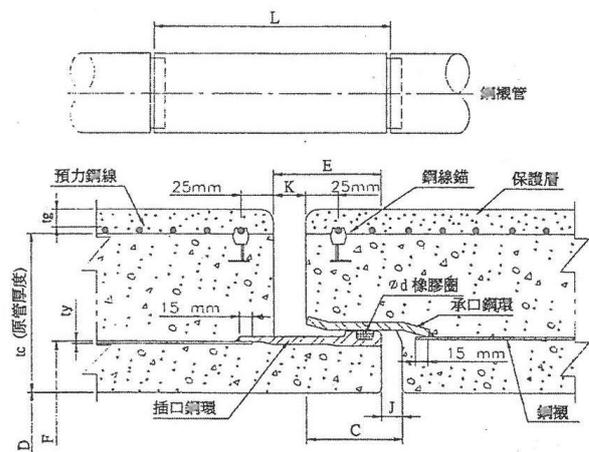


圖 6 PCCP 管結構圖

##### (二)檢測結果

本案檢測 PCCP 管支數共 430 支，每

支長 5m，總長度累計 2.15 km，結果顯示訊號異常者共 15 支，分為斷線異常、訊號異常無斷線、疑似管道等級變化無斷線等 3 類，其中有斷線異常者 3 支，無斷線異常者 12 支，現場檢測情形如圖 7，斷線異常管線位置示意圖如圖 8。



圖 7 現場檢測情形



圖 8 斷線異常管線位置示意圖

廠商檢測結果分析以百分比呈現，北投幹線（北投加壓站~雙溪橋前）共有 96.5 % 呈現管道無異常、0.7 % 呈現管道有斷線訊號、1.2 % 管道有異常無斷線、1.6 % 管道疑似等級變化，詳圖 9 檢測結果百分比圖及表 5 檢測管道彙總表。

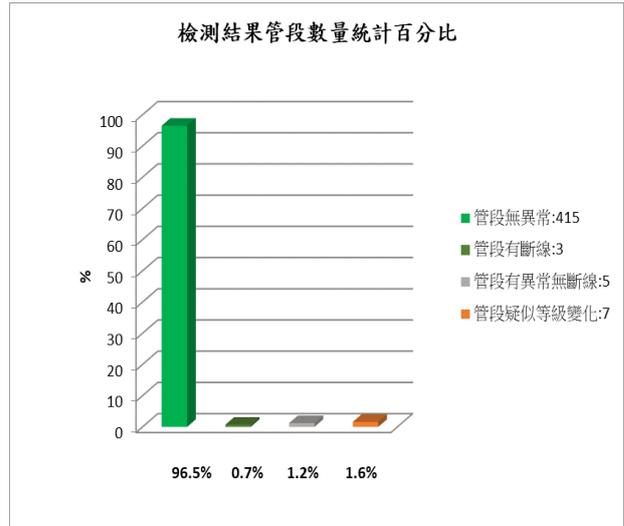


圖 9 檢測結果百分比圖

表 5 檢測管道彙總表

管線名稱	管線編號	直徑 (mm)	PCCP 長度 (m)	檢測管道數量 (支)	出現斷線的管道		接頭損壞數量
					數量 (支)	%	
北投幹線	A 段管線	1,500	1185	237	1	0.42	0
	B 段管線		965	193	2	1.03	0
合計			2,150	430	3	0.7	0

透過對檢測數據的分析，本次北投幹線所檢測的 430 支管道中，3 支管道電磁訊號呈現與斷線相同的訊號，依斷線數量進行分類，詳表 6 受損管道彙總表。大範圍異常管道詳細情況詳表 7，表中的斷線位置表示斷線區域的中點與該段管道上游端之間的距離。

表 6 受損管道彙總表

管線名稱	管線編號	檢測管道數量 (支)	小於等於 5 根斷線	大於 5 和小於等於 15 根斷線	大於 15 根斷線	大範圍異常
			數量	數量	數量	數量
北投幹線	A 段管線	237	-	-	-	1
	B 段管線	193	2	-	-	-
合計		430	2	-	-	1

表 7 大範圍異常管道詳細表

Xylem 編號	管道編號	管長 (m)	斷線位置 (從上游算起, m)
1081	A-2-83	5	0.0~5.0

管道編號 A-2-83 檢測結果為大範圍異常，顯示整個管道長度上均發生了訊號的異常變化，即管道的異常橫跨整個管道的長度。經廠商研判這並不表示所有的鋼線均發生了斷裂(即在整支管道斷線中可能存在間歇性完好鋼線)，故只給出受損範圍，不估計斷線數量。大範圍異常係指可能整支管道受損，也可能是整個區域出現腐蝕引起的斷線，或是由氫脆引起的間隔分布的少量零星斷線。(註：氫脆現象為金屬材料在冶煉、加工、熱處理、酸洗和電鍍等過程中，或在含氫介質中長期使用時，材料由於吸氫或氫滲而造成機械性能嚴重退化，發生脆斷的現象)

表 8 列出了本次檢測的北投幹線工程之受損管道。

表 8 受損管道詳細表

Xylem 編號	管道編號	管長 (m)	斷線位置 (從上游算起, m)	單個區域斷線數量	總斷線數量
4059	B-4-92	5	3.9	5	5
5086	B-2-47	5	3.5	5	5

本案檢測共發現 5 支訊號異常管道，異常管道詳細情況見表 9。廠商分析異常訊號管道確定無斷線，研判異常情形可能是由管線上的未知管件引起，也可能由管

道參數改變引起。

表 9 訊號異常無斷線管道詳細表

Xylem 編號	管道編號	管長 (m)	異常位置 (從上游算起, m)
81	A-3-17	5	2.4~3.0
1075	A-2-77	5	3.8~4.3
3017	B-6-28	5	0.8~1.3
4067	B-4-100	5	2.8~3.4
5071	B-2-32	5	3.8~4.3

疑似管道等級變化無斷線的詳細情況見表 10，訊號基準線的變化可能是管道等級發生變化所引起，分析人員需要進一步的管道訊息，才能確定引起訊號異常的真正原因，管線上存在訊號基準線不同的管道這一現象並不少見，判定此類管道無斷線情況。

表 10 疑似管道等級變化無斷線詳細表

Xylem 編號	管道編號	管長 (m)	訊號異常範圍 (m)
83	A-3-19	5	0.0~5.0
84	A-3-20	5	0.0~5.0
85	A-3-21	5	0.0~5.0
86	A-3-22	5	0.0~5.0
88	A-3-24	5	0.0~5.0
92	A-3-28	5	0.0~5.0
108	A-3-44	5	0.0~5.0

## 六、管路整體性能安全評估及修繕方案之建議

本案渦電流檢測系統僅能就檢測當時 PCCP 管的狀況預估其健康情形及安全性，依現階段渦電流檢測結果、管內目視檢查及敲擊聽音施作結果分析，管線編號 B-4-92 及 B-2-47 受損管道斷線數量判讀皆為 5 根，廠商評估此 2 支斷線程度尚未影響結構安全；另管線編號 A-2-83 無法判斷實際受損斷線數量，經比對此管道目視檢查沒有明顯裂痕、裂縫及孔洞跡象，敲擊聽音結果亦是無空洞聲，相鄰連接之 PCCP 管渦電流檢測結果皆為正常，後續廠商並以有限元分析(FEA)綜合研判，管道應為完整鋼線間隔少量斷線，但整段檢測訊號因斷線間隔多處而呈現異常，而不是大量斷線狀態，以目前工作壓力約 2kg/cm<sup>2</sup> 操作之條件下，以及考慮水錘壓力，評估應暫無影響結構安全，惟相關檢測判讀結果尚待進一步探討。

上述 3 支斷線管道，其位置皆為單獨非鄰近狀態，未來若經評估驗證需修復，廠商建議修繕方案以局部修復單支修繕較為適宜，所需經費較低且較易達成修繕目標。

常見的局部修復單支修繕方案有一般明挖更換鋼管、外部施加預應力、FRP/碳纖維內部修繕工法等工法；區段翻修修繕方案有 GFRP 板塊工法、反轉內襯工法等方案，惟各項修繕方案尚需多方考量評估可行方案，避免影響民生用水及交通衝擊等

問題產生。

## 七、結語

(一)本案共檢測了 430 支 PCCP 管道，其中 3 支管道顯示斷線訊號；5 支管道出現局部異常無斷線；7 支管道疑似管道等級變化。有 2 支管道斷線根數(皆 5 根)，另 1 支編號 A-2-83 屬大範圍異常，上述檢測線型判讀方式、邏輯及損害等級尚需整體探究。

(二)工作壓力對於受損管段之鋼線殘餘應力影響很大，高工作壓力將減低鋼線殘餘應力，以低於設計壓力的較低工作壓力進行操作，對於目前管段使用應是較安全的操作方式，因此停、復水應緩慢進行，以降低管內壓力變化速度。另外，對於送水時管內殘餘空氣排出要有相當操作經驗，避免管內空氣聚集形成積壓而造成管線受損。

(三)參考國外類似案例，PCCP 管道如有斷線情形，會呈現逐年加劇的趨勢，特別是斷線發展到一定程度後，會加速發展到局部受損或者整支受損，定期斷線檢測可及時瞭解管道的惡化情況，惟目前應用於 PCCP 管之渦電流檢測技術尚待驗證，如檢測成果獲得實際驗證可行且經濟有效，後續配合自來水設施整備計畫，針對轄內老舊之

中大口徑自來水幹管(PCCP、PSCP 等預力管線)逐年進行全面檢修、維護及汰換，方有推廣機會，對於強化供水安全始有助益。

### 參考文獻

1. 橋豐科技股份有限公司，北投幹線（北投加壓站~雙溪橋前） $\phi$  1500mm 鋼襯預力混凝土管線(PCCP) 檢測檢測成果報告書(未定案)，109 年(2020)。
2. 鄭錦澤，從自來水重要幹管災損與維護資產風險管理探討，105 年(2016)，中華民國自來水協會會刊，第 35 卷，第 1 期，第 57-68 頁。
3. 經濟部水利署南區水資源局，「南化水庫與高屏溪攔河堰聯通管路」復通水前管路系統安全複核報告，2008 年 2 月。
4. CNS12285 鋼襯預力混凝土管規範。