



中華民國自來水協會107年度研究計畫

自來水配水管材選用策略之研究

— 以北水處供水管網為例

委託單位：中華民國自來水協會

研究單位：中華民國自來水協會管理研究委員會

計畫主持人：陳明州

研究人員：時佳麟、許敏能、黃欽稜、
張正忠、呂紹禎、宋奕穎

研究期間：107年3月至107年11月

中華民國107年10月

目錄

摘要	1
Abstract	2
第一章 前言	3
1.1 研究緣起	3
1.2 研究目的與流程	4
1.3 研究方法與預期成果	6
1.4 研究範圍與限制	7
第二章 文獻探討	8
2.1 文獻蒐集內容概述	8
2.2 鑄鐵材料的特性及優點	9
2.2.1 國外各類管材與鑄鐵管使用概況	9
2.2.2 鑄鐵材料成分及微構造	13
2.2.3 與其他金屬管材之力學行為比較	22
2.2.4 鑄鐵之其他特性及優點	27
2.3 管材內襯之演進及功能	32
2.3.1 古代供水管線材質	32
2.3.2 近代管線與內襯保護的興起	34
2.3.3 熱固型管材塗層介紹	49
2.4 管網化學穩定性分析及內襯強度實測案例	56
2.4.1 管網中化學穩定性判別方法	56
2.4.2 國外管線內襯之相關案例	63
2.4.3 粉體塗裝抗剝離強度試驗	69
2.5 地下管線之抗震措施	82
2.5.1 地下管線的地震反應及破壞	83

2.5.2 國內外地下管線震損分析.....	88
2.5.3 國外耐震鑄鐵管接頭應用實績.....	102
2.6 小結.....	116
第三章 DIP 管內襯塗裝對水質及防蝕探討.....	118
3.1 水泥內襯對水質影響.....	118
3.1.1 內襯溶出參數及管網水理模型.....	118
3.1.2 新管吐鹼之管網擴散模擬.....	123
3.1.3 管壁自潔淨流速分析.....	133
3.2 DIP 管內部粉體塗裝對水質之影響.....	137
3.2.1 雙酚 A 簡介及對健康之影響.....	137
3.2.2 研究方法.....	139
3.2.3 試驗步驟.....	140
3.2.4 試驗結果.....	142
3.2.5 其他環氧樹脂可能溶出物探討.....	144
3.3 DIP 管內部粉體塗裝品質之探討.....	145
3.3.1 粉體塗裝與液態塗裝介紹.....	146
3.3.2 研究方法.....	149
3.3.3 拉拔試驗步驟.....	152
3.3.4 拉拔強度試驗結果.....	156
3.4 小結.....	161
第四章 配水管施工之管材需求探討.....	163
4.1 施工常見問題分析.....	163
4.2 耐震 NS 接頭試辦.....	164
4.2.1 耐震接頭(NS 型)簡介.....	165

4.2.2	耐震接頭(NS 型)基本施工方法簡介	168
4.2.3	試辦緣起.....	182
4.2.4	試辦區域的選定	184
4.2.5	委託技術顧問服務勞務案.....	185
4.2.6	施工試辦標案規劃	187
4.2.7	施工前置準備工作	187
4.2.8	耐震接頭(NS 型)與 K 型接頭施工差異分析.....	189
4.3	波狀管與障礙物施工探討.....	198
4.3.1	小型波狀管	199
4.3.2	大型波狀管	202
4.3.3	障礙物施工-排水側溝	208
4.3.4	障礙物施工-雨水箱涵	212
4.4	高密度聚乙烯(HDPE)管探討.....	225
4.4.1	高密度聚乙烯(HDPE)管材簡介.....	225
4.4.2	高密度聚乙烯(HDPE)管材施工方式簡介	228
4.4.3	高密度聚乙烯(HDPE)管材施工案例介紹	231
4.4.4	高密度聚乙烯(HDPE)管材採用建議.....	235
4.5	小結.....	235
第五章 DIP 管材優化之推動		237
5.1	DIP 粉體塗裝規範修訂.....	237
5.1.1	拉拔試驗允收強度制訂	237
5.1.2	允收「平均強度」判定法則.....	238
5.1.3	允收「最低門檻」強度法則.....	240
5.1.4	粉體內襯規範修訂與鑄鐵廠商交流會議	242

5.1.5 驗收委託第三方公正實驗室	248
5.1.6 雙水分享交流	251
5.2 管材倉儲品質確保	252
5.3 施工過程管材操作	254
5.3.1 施工管理	254
5.3.2 施工鑽孔剝落問題探討	256
5.3.3 塗層修補問題探討	262
5.4 耐震管材後續推動	263
5.4.1 建置配水管網地震損害風險地圖	263
5.4.2 耐震接頭(NS 型)在地化生產	267
5.5 小結	270
第六章 結論及建議	271
6.1 配水管材選用策略	271
6.2 結論及建議	273
參考文獻	275

圖目錄

圖 1-1 研究流程	6
圖 2-1 北美洲(美國及部分加拿大)的既存管線長度 ¹	10
圖 2-2 北美洲 9 個地區的既存管線比例 ¹	11
圖 2-3 美國 4 個地區的管線使用比例變遷與預測 ²	12
圖 2-4 碳及矽含量對鑄鐵組織的影響 ⁴	14
圖 2-5 FC 灰口鑄鐵碳當量與抗拉強度的關係 ⁴	15
圖 2-6 鼓風爐的構造與製鐵原料分層堆置情況 ⁴	16
圖 2-7 低週波感應電爐的構造 ⁴	16
圖 2-8 國內某鑄造廠鐵水樣品之成分比例	17
圖 2-9 球狀石墨(左)、片狀石墨(右)組織構造 ⁶	18
圖 2-10 肥粒鐵基地(左)、肥粒鐵+波來鐵基地(右)球墨鑄鐵 ¹	18
圖 2-11 球狀石墨鑄鐵的典型組織構造 ⁷	19
圖 2-12 國內某鑄造廠的球墨鑄鐵金相照片	20
圖 2-13 ISO 945 石墨顆粒形狀的等級 ⁹	21
圖 2-14 以影像辨識軟體判讀球化率 ⁷	22
圖 2-15 應力-應變 σ - ϵ 曲線(右圖)及小應變範圍局部放大(左圖) ¹⁰	22
圖 2-16 灰口鑄鐵(FC).球墨鑄鐵(FCD).低碳鋼(SS)的 σ - ϵ 曲線 ¹¹	23
圖 2-17 FC、FCD、SS 小應變範圍的 σ - ϵ 曲線局部放大 ⁸	25
圖 2-18 不鏽鋼(SUS).碳鋼(SS)於小應變範圍的 σ - ϵ 局部放大 ¹²	26
圖 2-19 球墨鑄鐵與鑄鋼的澆鑄體積變化比較 ¹¹	28
圖 2-20 球墨鑄鐵與鑄鋼的切削能力比較 ¹¹	28
圖 2-21 球墨鑄鐵與低碳鋼的腐蝕速度比較 ¹¹	29
圖 2-22 球墨鑄鐵、灰口鑄鐵與低碳鋼的吸震阻尼比較 ¹³	30

圖 2-23 球墨鑄鐵與鑄鋼的磨損比較 ¹¹	31
圖 2-24 法國尼姆(Nimes)的分水池遺跡(黃欽稜繪)	33
圖 2-25 古羅馬供水管線之材質與管溝鋪設方式(黃欽稜繪)	33
圖 2-26 Dillenburg 城堡 1455 年所使用的鑄鐵管 ²⁶	35
圖 2-27 各種金屬的電位序列，愈往右側愈容易發生陽極腐蝕 ¹⁶	36
圖 2-28 鑄鐵管內部繡蝕(左)，以及「紅水」污染問題(右) ¹⁷	37
圖 2-29 美國 1971-2012 年水媒病爆發數(851 案)及種類(7 類) ¹⁸	38
圖 2-30 丹麥原水為地下水，淨水場只進行過濾，不得加氯消毒 ¹⁹	39
圖 2-31 現代水泥內襯延性鑄鐵管構造圖示 ²⁰	40
圖 2-32 水泥析出物質堆積在外產生的白華 ²³	41
圖 2-33 不同厚度煤焦油塗佈鑄鐵管的損壞比較(D 最厚) ²⁵	44
圖 2-34 荷蘭柏油塗佈內襯鑄鐵管，不同擾動後 PAH 釋出量 ²⁵	44
圖 2-35 於水泥表層塗佈加密封塗層之水泥內襯鑄鐵管 ²³	45
圖 2-36 僅塗佈環氧樹脂的鑄鐵管 ¹⁸	46
圖 2-37 環氧樹脂(上)鏈狀結構斷裂將析出雙酚 A(下) ³⁰	48
圖 2-38 管線粉體塗裝的製造流程 ³²	50
圖 2-39 中國大陸珠三角的某鋼管製造公司各系列塗裝產品 ³³	51
圖 2-40 粉體塗裝剝落(上)及剝落的機制圖示(下) ^{34、35}	53
圖 2-41 塗層內部孔隙(左)，不同塗層的吸水電阻試驗曲線 ³⁶	53
圖 2-42 粉體塗裝可讓電子流入，達成陰極保護避免腐蝕 ³⁸	55
圖 2-43 各類有機質塗層技術的演進 ³⁹	55
圖 2-44 兩類不穩定的水質：沉積結垢(左)鑄鐵腐蝕(右) ^{41、42}	58
圖 2-45 更簡單的兩參數判斷穩定性的「Baylis Curve」 ⁴⁵	60
圖 2-46 荷屬古拉索島的地理位置 [截圖自 Google Maps]	63

圖 2-47 古拉索事件管網的鋁離子濃度變化 ⁴⁷	64
圖 2-48 氫氧化鋁與鹼反應生成四羥基合鋁酸鹽溶於水中 ⁴⁷	65
圖 2-49 投入不同鹼劑對 LSI(上)及 LR(下)的影響 ⁴⁰	67
圖 2-50 鹼劑先加(左)及後加(右)對次氯酸鈉衰減的影響 ⁴⁰	68
圖 2-51 上海南市水廠更換水源前後管網內部 LSI 及 LR 變化 ⁴⁰	69
圖 2-52 粉體塗裝起泡後再發生剝離導致鑄鐵失去保護 ⁴⁹	70
圖 2-53 交錯切割(上)、刮除(左)、剝離(右)等試驗 ^{50、51、52}	71
圖 2-54 符合 ASTM 規範的其中一種拉拔試驗設備 ⁵³	72
圖 2-55 由 ASTM 認可的 Type III 自動定心拉拔器及其設備 ⁵⁴	73
圖 2-56 各層符號定義(右下)破壞模式紀錄(上, 左下) ⁵⁵	75
圖 2-57 DNV 公司以 Type V 型的拉拔器測試粉體強度 ⁵⁶	76
圖 2-58 狀況良好(左)及刻意加工致起泡(右)做拉拔試驗 ⁵⁶	78
圖 2-59 於粉體與鑄鐵破壞面灌注樹脂翻模表面構造(右) ⁵⁶	79
圖 2-60 三種加速劣化與原始狀態的粉體拉拔強度數據 ⁵⁶	79
圖 2-61 浸泡 NaOH 加速劣化前後的粉體強度及弱化層 ⁵⁷	80
圖 2-62 浸泡 NaOH 劣化前(左)後(右)粉體電子顯微鏡掃描 ⁵⁷	81
圖 2-63 地震產生的震波與傳遞示意圖 ⁵⁹	84
圖 2-64 「地面運動」加諸於管線的震動模式, 以軸向壓伸為主 ⁶⁰	84
圖 2-65 地震導致的「地面變形」對管線施加橫移力量 ⁶¹	85
圖 2-66 墨西哥 1985 年地震之場址效應導致的低頻放大 ⁶²	87
圖 2-67 軟弱土層在地震時增加地下管線軸向拉伸變形 ⁶³	88
圖 2-68 東日本大地震仙台市加速度紀錄及管損分布 ^{64、65}	90
圖 2-69 2016 熊本地震各類管線損壞佈點及震央、斷層破裂面 ⁶⁶	91
圖 2-70 阪神地震管材每公里損壞件數 ⁶⁷	92

圖 2-71	阪神大地震土壤液化管材浮起脫接、軸向壓縮損壞 ⁶⁸	92
圖 2-72	東日本大地震後地下管道只有耐震接頭無損(詳箭頭) ⁶⁸	93
圖 2-73	阪神大地震水、電復原推移圖 ⁶⁸	94
圖 2-74	東日本大地震自來水系統復原推移圖 ⁶⁹	94
圖 2-75	花蓮地震前震(藍色)、餘震(紅色)、震度(節錄自 NARlabs).....	95
圖 2-76	花蓮市地震站加速度及地動反應譜(節錄自 NARlabs).....	96
圖 2-77	花蓮 206 地震主要配水幹線損壞位置圖(台水九區處提供).....	97
圖 2-78	花蓮 206 地震發生的配水幹管挫曲破壞(台水九區處提供).....	98
圖 2-79	花蓮 206 地震漏水導致淨水場出水增加(台水九區處提供).....	99
圖 2-80	South Napa 地震之配水管爆管及路面破裂佈點 ⁷⁰	100
圖 2-81	South Napa 地震後部分斷層持續潛變滑動 ⁷¹	101
圖 2-82	South Napa 主震後的斷層潛變使地表持續變形 ⁷¹	101
圖 2-83	洛杉磯水電處 LADWP 引進久保田 GX、NS 型耐震管材 ⁷¹ ...	103
圖 2-84	美國傳統柔性接頭與日本耐震接頭構造比較 ⁷¹	104
圖 2-85	美國 U.S. PIPE 生產的耐震接頭 TR XEREME(U.S. Pipe 網站)	106
圖 2-86	美國 AWWA 管材標準中脆弱性較低的兩類防脫接頭 ⁵⁶	107
圖 2-87	American Pipe (上)及臺灣興南(下)的 K-Bar 防脫接頭	108
圖 2-88	興南鑄造廠的 T-Bar 防脫接頭(公司官網).....	109
圖 2-89	東京都水道局各口徑配水管採用耐震接頭的年份 ⁷²	110
圖 2-90	東京都 90 年代開始使用插入型的 NS 耐震接頭 ⁶⁷	111
圖 2-91	日本各種繼手(接頭)開始使用的年代 ⁷³	111
圖 2-92	東京都水道局耐震管材的優先安裝位置 ⁷²	112
圖 2-93	可撓管力學一直管段不變形，管件附近變形(ORK 官網)	113
圖 2-94	於東日本大地震發揮功效的不鏽鋼伸縮管 ⁷⁴	113

圖 2-95 美國延性鑄鐵管研究協會推薦伸縮管應搭配耐震管 ⁷⁵	114
圖 2-96 運用耐震接頭及伸縮可撓管橫越斷層 ⁷⁶	115
圖 2-97 不論斷層錯動位置在哪，管身應力均在容許值內 ⁷⁶	116
圖 3-1 由靜置溶出試驗求取內襯兩項參數.....	119
圖 3-2 以 4 種不同管壁之 TDS 溶出實測值擬合出 K 及 C _L	120
圖 3-3 按照管徑尺度修正反應係數 K 值.....	121
圖 3-4 EPANET 內部的參數設定方式	122
圖 3-5 將擬合的參數套入 EPANET，模擬 4 根靜置溶出濃度	123
圖 3-6 以實際中區模擬流動狀態下管壁溶出到水中的 TDS 擴散	124
圖 3-7 區域入口埋管(未磨內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析 ..	125
圖 3-8 區域入口埋管(磨掉內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析 ..	126
圖 3-9 區域末端埋管(未磨內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析 ..	128
圖 3-10 區域末端埋管(磨掉內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析.	129
圖 3-11 區域末端埋管(未磨水泥乳)之 TDS 擴散分析局部放大	130
圖 3-12 區域中間埋管(未磨內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析.	131
圖 3-13 區域中間埋管(磨掉內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析.	132
圖 3-14 本研究區域管網「最大時」流速分布圖與分佈比例	136
圖 3-15 溶出試驗之試驗規劃圖	139
圖 3-16 溶出試驗現場配置圖	140
圖 3-17 注入萃取試液及取樣	142
圖 3-18 三種管材溶出試驗雙酚 A 檢測結果.....	143
圖 3-19 粉體剝落堵塞水表.....	145
圖 3-20 粉體塗料與液態塗料的塗膜形成過程 ⁷⁹	146
圖 3-21 環氧樹脂粉體塗料	

圖 3-22 旋轉噴塗法 ⁷⁹	147
圖 3-23 靜電塗裝法 ⁷⁹	148
圖 3-24 粉體內襯的製作流程	149
圖 3-25 拉拔器及配件圖	150
圖 3-26 待測管材剖半切割	151
圖 3-27 拉拔試驗步驟	154
圖 3-28 多層塗裝的破壞情形描述	155
圖 3-29 單層粉體的破壞情形描述	156
圖 3-30 興南與栗本破壞模式及強度關係	158
圖 3-31 破壞模式及強度關係	160
圖 3-32 國內鑄鐵廠商管件粉體塗裝須提升的製程	160
圖 3-33 日本粉體內襯管通水後之內襯狀況	160
圖 4-1 地震後輸水幹管受損情形及沿主要道路鋪設的明管	163
圖 4-2 NS 型延性鑄鐵管標示方式圖	166
圖 4-3 NS 型承口伸縮型(直管)接合示意圖	166
圖 4-4 NS 型承口伸縮型(直管)接合完成圖	166
圖 4-5 NS 型耐震接頭橡膠圈	167
圖 4-6 NS 型耐震接頭防脫環定心橡膠圈和防脫環	167
圖 4-7 NS 型耐震接頭防脫環定心橡膠圈和防脫環接合後	167
圖 4-8 NS 型直管耐震接頭伸縮量	168
圖 4-9 固定防脫環	169
圖 4-10 裝置橡膠圈	169
圖 4-11 測量橡膠圈位置	170
圖 4-12 潤滑劑塗抹範圍	170

圖 4-13 安裝接合器具.....	171
圖 4-14 接合完成	171
圖 4-16 套筒接合配件.....	172
圖 4-17 膠圈及背托環續裝置及防脫環及定心用橡膠圈拆除	172
圖 4-18 套筒接合插口端間距.....	173
圖 4-19 續接管脫環及定心用橡膠圈再度裝上.....	173
圖 4-20 套筒接合螺栓旋緊順序	174
圖 4-21 300mm~450mm 套筒接合裝上擋板.....	174
圖 4-22 300mm~450mm 套筒接合插口端間距	175
圖 4-23 切管及插口製作配件	175
圖 4-24 切溝並以銼刀去除毛邊.....	176
圖 4-25 使用標準量規確認溝槽深度	176
圖 4-26 切管去除毛邊並確認端面至溝槽的距離.....	176
圖 4-27 切管後插口端開口部標示長度 50mm 記號.....	177
圖 4-28 在長度 50mm 記號範圍作出倒角	177
圖 4-29 切管後插口端使用專用修補液進行修補.....	177
圖 4-30 裝上插口環	178
圖 4-31 直管承口與管件插口接合所需配件.....	178
圖 4-32 確認直管承口襯墊筒與承口壁之間隙.....	179
圖 4-33 量測承口端面至襯墊筒之距離並於管件上標示	179
圖 4-34 300mm~450mm 直管承口與管件插口接合所需配件.....	179
圖 4-35 確認管件承口深度並在直管承口上標示	180
圖 4-36 確認管件承口與所標示之白漆是否對齊.....	180
圖 4-37 300mm~450mm 直管插口與管件承口接合配件	181

圖 4-38 確認管件承口深度並在直管承口上標示	181
圖 4-39 安放止水橡膠圈、背托環並裝上賞擋板	181
圖 4-40 確認橡膠圈位置	182
圖 4-41 2016 年 9 月 4 日至東京都水道局實務研習	183
圖 4-42 山腳斷層位置及發生地震時液化潛勢圖	184
圖 4-43 山腳斷層發生錯動時各地區 PGA、PGD 及液化機率	185
圖 4-44 北水處小區規劃分佈及液化潛勢分布情形	185
圖 4-45 直潭淨水場 DIP 管訓練場管線平面圖	186
圖 4-46 北水處試辦工程標施工前第 1 階段探挖情形	188
圖 4-47 施工初期接頭處擴挖完成 2.0 公尺 x 1.4 公尺	190
圖 4-48 管溝全部清出後日本專家於管溝下規劃配管噴漆	191
圖 4-49 耐震接頭(NS 型)遇管障需反覆測量規劃配管	191
圖 4-50 直管切管與插口環處理較為費時	192
圖 4-51 日本專家確實完成自主檢查工作	192
圖 4-52 耐震接頭(NS 型)所使用之扭力扳手	196
圖 4-53 國內承商自行改良前後之切管用水管架	196
圖 4-54 耐震接頭(NS 型)粉體塗裝內襯所使用之電動鑽孔機	197
圖 4-55 傳統不鏽鋼管接頭與波狀管比較	199
圖 4-56 用戶給水管以傳統不鏽鋼管安裝	200
圖 4-57 用戶給水管以不鏽鋼波狀管安裝	200
圖 4-58 小口徑不鏽鋼波狀管歷年採購單價	201
圖 4-59 20mm 與 25mm 不鏽鋼直管與波狀管歷年採購價格	202
圖 4-60 大型波狀管接頭種類示意	203
圖 4-61 75mm 以上自來水用波狀不銹鋼管	203

圖 4-62	金屬編織保護層參考網型	205
圖 4-63	波狀可撓部最小彎曲半徑示意圖	205
圖 4-64	三重區福裕街 54 號現場管障與施工現況	206
圖 4-65	三重區福裕街 54 號管線裝接比較	206
圖 4-66	三重區福裕街口現場管障與施工現況	207
圖 4-67	三重區福裕街口管線裝接比較	207
圖 4-68	給水管線橫越側溝	209
圖 4-69	給水管線無法從側溝下方穿越	209
圖 4-70	給水管線無法從側溝下方穿越	210
圖 4-71	過溝槽鋼單元組成示意	210
圖 4-72	50mm 以下給水管線由第一單元穿越	211
圖 4-73	過溝蓋版進行載重試驗	211
圖 4-74	小型波狀管結合過溝蓋版	212
圖 4-75	管線橫越雨水箱涵影響程度分級	213
圖 4-76	短管推進現場工作井設置與施工	214
圖 4-77	U 型延性石墨鑄鐵管接頭	215
圖 4-78	T 型延性石墨鑄鐵管接頭	215
圖 4-79	配合雨水箱涵進行短管推進範圍示意	216
圖 4-80	圓形鋼管壓入土壤並掘削運棄土壤	217
圖 4-81	安裝機頭並推進 T 型短管	218
圖 4-82	自來水管線以原口徑進行管線遷移改善	219
圖 4-83	某中區以 EPANET 進行最大流量分析	219
圖 4-84	壓力損失不影響供水	220
圖 4-85	縮小管線口徑或以多支 50mmSSP 進行連接	220

圖 4-86 兩端封管並斷除雨水箱涵內部管線.....	221
圖 4-87 小區內多處斷管造成供水穩定高風險.....	222
圖 4-88 臺北市雨水箱涵標準尺寸與斷面圖.....	223
圖 4-89 自來水管線與雨水箱涵頂版共構設計圖.....	223
圖 4-90 自來水管線與雨水箱涵頂版共構施工示意圖.....	224
圖 4-91 陽明山礮區 DIP 管腐蝕嚴重.....	225
圖 4-92 熱熔對接法施工示意圖.....	229
圖 4-93 電套鉚熔接法施工示意圖.....	230
圖 4-94 法蘭機械接頭接法施工示意圖.....	230
圖 4-95 管溝岩方破碎打除.....	232
圖 4-96 管溝外 HDPE 管熱熔對接施工.....	232
圖 4-97 管溝內 HDPE 管熱熔對接施工.....	232
圖 4-98 HDPE 管熱熔對接施工完成.....	233
圖 4-99 HDPE 管安裝完成情形.....	233
圖 4-100 管溝開挖至 HDPE 管並安裝鞍帶分水栓.....	234
圖 4-101 電熔加熱鞍帶分水栓.....	234
圖 4-102 鞍帶分水栓鑽孔及給水管件安裝.....	234
圖 5-1 管件的機率密度與拉拔強度圖-平均強度.....	239
圖 5-2 直管的機率密度與拉拔強度圖-平均強度.....	239
圖 5-3 管件的機率密度與拉拔強度圖-最低強度.....	240
圖 5-4 直管的機率密度與拉拔強度圖-最低強度.....	241
圖 5-5 興南交流與說明拉拔試驗.....	244
圖 5-6 錦源交流與說明拉拔試驗.....	245
圖 5-7 欣冠交流與說明拉拔試驗.....	245

圖 5-8 試驗管材及試驗環境.....	246
圖 5-9 欣冠拉拔試驗數據.....	247
圖 5-10 2018 年 10 月 1 日雙水交流情形	251
圖 5-11 自粘性塑膠貼布破裂難以修補	252
圖 5-12 蓋子進行封口避免粉體塗裝劣化	253
圖 5-13 管材吊掛方式.....	254
圖 5-14 管材放置方式.....	255
圖 5-15 電動鑽孔機與粉體鑽頭	256
圖 5-16 粉體塗裝管 20mm 給水鞍帶鑽孔測試	256
圖 5-17 電動鑽孔機與十字鑽孔機(手動).....	257
圖 5-18 鑽孔試驗的構想.....	258
圖 5-19 水泥鑽頭加工前後角度.....	259
圖 5-20 鑽孔規劃示意圖.....	259
圖 5-21 現場鑽孔試驗.....	260
圖 5-22 20mm 鑽孔試驗結果.....	260
圖 5-23 50mm 鑽孔試驗結果.....	261
圖 5-24 粉體塗裝管切管區域.....	262
圖 5-25 粉體塗裝管切管後修補夜修補情形.....	262
圖 5-26 配水管網損害風險地圖涵蓋因素	264
圖 5-27 配水管網損害風險地圖示意圖	266
圖 5-28 以 K 型管件搭配防脫壓圈替代 NS 型管件.....	268
圖 5-29 接頭拉力試驗.....	269

表目錄

表 2-1 德國各類管線長度、總漏水案件及每百公里漏水件數 ³	13
表 2-2 各種主要水泥鋁含量比例，以及某研究所測得之比例 ²⁴	43
表 2-3 環氧樹脂溶出的 25 種化學物質對應民眾舉報異味 ²⁹	47
表 2-5 水中碳酸鈣化學穩定性判別指數 ⁴³	61
表 2-5 使用 20 年粉體管外壁狀況良好之處的拉拔試驗 ⁵⁶	77
表 2-6 各類 AWWA 管材標準的脆弱性(Vulnerability)分類 ⁵⁶	105
表 2-7 ISO 16134 接頭耐震等級標準[ISO, 2006]	109
表 3-1 DIP 管材溶出試驗程序	141
表 3-2 三種管材溶出試驗雙酚 A 檢測濃度.....	142
表 3-3 三種管材雙酚 A 溶出之健康風險評估.....	144
表 3-4 各種標準檢項管制標準最大限值比較表.....	144
表 3-5 直潭倉庫取得之管件表	152
表 3-6 興南與栗本平均拉拔強度及破壞模式比較表.....	157
表 3-7 廠商 A、B 與栗本平均拉拔強度及破壞模式比較表.....	159
表 4-1 北水處 2010 年 NS 型鑄鐵管種子人員教育訓練課程表	182
表 4-2 耐震接頭(NS 型) 各項接頭檢查表 1.....	193
表 4-3 用戶給水傳統施工與波狀管施工使用材料比較	202
表 4-4 自來水用波狀不銹鋼管分類表	203
表 4-5 75mm 以上自來水用波狀不銹鋼管構造說明表.....	204
表 4-6 波狀可撓部最小彎曲半徑表	205
表 4-7 PE 種類及其材料密度範圍(ASTM D1248)	226
表 5-1 延性鑄鐵直管及管件規範修訂內容.....	243
表 5-2 TAF 拉拔實驗室	248

表 5-3 耐震接頭(NS 型) 與延性鑄鐵管(K 型)材料差異.....	267
表 6-1 自來水管線選用策略表.....	272

摘要

本研究聚焦於臺北自來水事業處使用之配水管材與水質、防蝕、耐震、施工有關之議題，又以北水處管網改善與管理計畫使用最多的鑄鐵管為研究標的，透過文獻蒐集比較國內外配水管鑄鐵冶金特性、內襯溶出性、管網化學穩定性、接頭耐震性。DIP內襯方面，以實際拉拔試驗探討增訂粉體塗裝內襯拉拔允收強度、實際溶出試驗分析環氧樹脂釋出新興污染物趨勢、實際鑽孔試驗改良適用粉體塗裝之鑽頭、實際水泥內襯TDS溶出試驗結合EPANET模擬管網吐鹼及擴散；耐震管材方面，則以現地埋設NS型耐震管的全臺第一手經驗，探討未來推廣策略；配水管現地施工方面，包括橫越箱涵或管線障礙之獨特工法、波狀管材之應用、溫泉水道採用HDPE對抗酸蝕之經驗談等相關主題。

為改善管網化學穩定性、避免水泥吐鹼問題、提升既有粉體塗裝強度，本研究以超過3百筆拉拔試驗訂定粉體塗裝多點平均允收強度法則、透過TAF實驗室進行第三方試驗，公正驗收粉體內襯、提出粉體內襯之施工鑽孔、裁切修補、倉儲注意事項，確保其耐用性，以供國內自來水事業參考。

在臺北盆地高潛勢液化區及地震場址效應之隱憂下，為提升供水管網之耐震能力，繼洛杉磯水電處(LADWP)之後，北水處為全球第二個引進日本NS耐震管材之自來水事業。本研究深入剖析全臺第一處NS施工運用案例，包含JWWA規範沿用修訂、施工教育訓練、工法作業調整與NS管件改用防脫接頭等，並提出在地生產之推動策略，以降低材料進口成本。

對於管線繞越或穿越地下障礙物之施工瓶頸，本研究亦提出各項可行之克服方案，依現場條件選用合適管材與工法，俾利提升管線汰換效能，以健全供水管網。本案係國內首次針對配水管材進行廣泛性之探討研究，透過業界廠商之參與協助，希冀研究成果能提供自來水事業運用參採。

Abstract

This research is focused on water mains of Taipei Water Department (TWD) subject to issues of water qualities, corrosion-proof, earthquake resistance, and pipe-laying, mainly relating to the ductile iron pipe which has been widely adopted in the Leakage Control Project of Taipei. This paper comprises of world-wide case studies of cast iron metallurgy, leaching of lining, network chemical stability, earthquake-proof joints. Referring to lining, by pull-off tests to establish an allowable strength for FBE, by leaching tests to identify Emerging Contaminants releasing, by drilling tests to improve drill bits suitable for FBE, by EPANET simulations to depict TDS risings from cement mortar linings; Referring to earthquake proof pipes, by introducing the very first NS pipe-laying in Taiwan to formulate the strategies for further adoption of earthquake resistant joints; Referring to in-situ application, by reporting flexible stainless steel joints of crossing tasks & HDPE of hot spring to share our techniques with other utilities, then we conclude a strategy of water main selection for different scenarios.

To improve the chemical stability in the network, avoiding cement lining from leaching & in order to increase the adhesive strength of FBE, this research has conducted a global leading experiment with more than 300 pull-off tests and has suggested a standard of allowable strength for inspections and acceptances which will be carried out by TAF accredited labs.

Under the threat of liquefaction & amplification due to soft soils in the basin, Taipei is always keen to enhance its earthquake viability of water mains. TWD is the second utility around the world introducing Japanese earthquake-resistance joints (NS type) right after Los Angeles Department of Water & Power(LADWP). This paper reports the very first adoption with pipe-laying procedures, adjustment of JWWA codes & specifications, education of piping work, and alteration of fittings from NS to K type and concludes a domestic manufacture ourselves is the key to cost-reduction.

Referring to coping with the underground barriers in pipe-laying, this research introduces several feasible methods in accordance with in-situ conditions, suggesting suitable piping materials & technologies. Those efforts can increase the efficiency both in construction manners & pipeline networks. Thanks to the participation of utilities & manufacturers, we are confident the outcomes from this research shall be an useful reference for utilities.

第一章 前言

1.1 研究緣起

臺北自來水事業處(以下簡稱北水處)為提供質優量足的供水，確保自來水輸配過程水質穩定，自民國70年左右，配水管材開始選用外部以柏油塗裝、內部採水泥砂漿襯裡(Cement lining)之延性石墨鑄鐵管(Ductile Iron Pipe, DIP)為主。而DIP管之機械接頭型式則在90年以後由原有A型提昇為耐震力相對較佳的K型機械接頭。北水處接著在92年起投入230億元推動漏水改善中、長程計畫，進行管線更新汰換，除了採用小區漏水率做為汰換順序的依據，預訂至民國114年將漏水率降低到10%以下外，並以「配水管DIP化、給水管SSP化」為汰換績效指標，老舊易漏損管材能有效汰換為DIP配水管及SSP給水管。然而，對於分佈在市區、山區及溫泉區不同地質環境特性的三千多公里配水管，因環境之不同將配水管網汰換為DIP管線時，逐漸發現需面對許多因選用管材而引起的管理風險。

首先是在供水末端、地勢較高區域及新設重劃區，時有水泥襯裡溶出造成pH值偏高現象，因用戶用水量較低，在施工時必須經常排水或加入醋酸或二氧化碳等微酸物質，利用洗管方式中和水泥造成鹼度偏高情形，但這些方法只能局部避免且效果有限。另外，北水處鑄鐵另件及閘栓內部，於88年開始使用粉體塗裝，但隨著粉體塗裝的使用，零星發現大表前濾網有脫落的粉體內襯造成阻塞問題，這些脫落的粉體發生原因眾說紛紜，但歸納起來包括，粉體材質、粉體加工程序、粉體檢驗方式、運送保護及施工精緻度問題，這些問題在討論解決DIP直管水泥襯裡溶出改用粉體內襯時更加重要，應對於不同的內襯變化對水質影響釐清確認外，更需精進倉儲、運送及施工管理作為，確保所使用的內襯不影響水質。

另外，隨著近年公佈土壤液化潛勢區域及山腳斷層路線圖，北水處需

重新審視面臨高強度地震時管線損壞風險，而在105年2月又發生台南大地震，造成管線大量損壞中斷供水情形，北水處開始重新思考選用較高耐震級數的管材，降低地震發生時因管線損壞而停止供水的風險。經評估於106年開始試辦導入日本NS型耐震接頭DIP管，選定區域進行管線汰換作業，並且輔導國內施工及管材製造商瞭解NS管材特性、辦理施工廠商人員訓練、採購NS管材及協助施工器具購買，並進行現場施工管理...等作業，均正在積極辦理汰換與進行輔導中。今(107)年2月花蓮大地震，再次發生管線損壞影響正常供水情形，北水處位在臺北盆地多屬中高級液化潛勢區的管網，更應積極從管材選用上檢討，方能因應未來地震來臨時，降低停止供水的風險。

在自來水配水管材選用策略另一項議題，則與北水處所處轄區有關，由於大臺北都會區開發較早，在五大民生管線中屬於很早就埋設於地下的管線設備，依照路權單位的規定，自來水管埋深均達管面1.2公尺深。但臺北市及部份新北市地區在都市景觀考量下，將原本掛在電桿上的電力、電信管線均下地埋設於道路，加上都市快速發展且未規劃管線位置情形下，道路下方民生管線飽和，自來水管線被埋壓情形屢見不鮮。常造成配水管無法汰換或連接原有管線，必須選用不同管材與施工技術，以克服問題健全管網，避免造成區域供水問題。

1.2 研究目的與流程

鑑於北水處20年200億元的管線汰換計畫已進入第三階段，本案研究目的，探討管網汰換時需考量以上不同問題，包括導入新型內襯、接頭型式或材質之不同管材，或配合採用不同技術施工方法時，瞭解未來相關採用的可行性。在汰換前，要面對道路下複雜管線空間環境，擬定遇到障礙時的對策。而汰換後，除需避免新設的管線造成水質變動及阻塞問題，更需

進一步考量，該管線在面臨地震時的損壞風險。極待建立一套有效管材選用策略，導入不同管材及施工方法，瞭解相關採用可行性，降低管網汰換時造成管理風險。

由於配水管材質種類多，本研究不加以全部詳述，僅聚焦於北水處二十年管網改善長程計畫所使用的配水管材—球墨鑄鐵管(DIP)、以及目前存在於供水管網系統中，仍在使用中尚未汰換的傳統鑄鐵管，為本研究主要標的。除了發掘固有狀況、分析既有問題，更搭配近年來北水處面對的新興議題，據以展開研究項目，產出最適選材、運用優化、性能改良等研究結論，並建議未來改善方式。

本研究重點分列如下，研究流程如圖1-1所示。

- 一、蒐集國內外鑄鐵管文獻，從金屬材質、管壁內襯、內襯溶出與強度、管線抗震方面，探討配水管所遭遇的新興議題。
- 二、由北水處配水管材水質、防蝕、耐震、施工使用上的需求，擬定研究架構：
 - (一)以EPANET 模擬自來水管網實際動態流下，內襯溶出物濃度與擴散機制，探討從水泥內襯、粉體塗裝、密封塗層三大類DIP內襯溶出特性及對水質之影響。
 - (二)北水處全面採用DIP管其外部塗裝為柏油漆並以PE套膜包覆，可大幅降低外部腐蝕機會，故本研究僅討論DIP管內部防蝕問題，除前述水泥襯裡水質問題外，為防蝕採用粉體內襯後，應注意製程控制不佳造成脫落情形，探討增加拉拔試驗做法，並規範直管及管件不同製程的塗料強度，研議訂定合宜之允收強度及檢驗規範。
 - (三)由北水處高液化潛能小區全面試作NS經驗，包括日本NS耐震接頭從材料規範、施工方法、訓練場地、現場實作整套引進，到管材製

造之在地生產，進行全面向之論述。

(四)羅列臺北穿越地下障礙如管線群、箱涵之作法，並討論最近試用的技術及材料，探討穿越上方之頂版保護、短管推進穿越下方、以及鑽縫隙的大波管使用經驗，及後續綜合運用方式。

三、針對DIP管材優化之推動，從粉體塗裝規範修訂、管材倉儲品質確保、施工過程管材操作及耐震管材後續推動各個環節，說明配水管材製造能力、產量及環境評估。

四、依據北水處經驗，訂定管網汰換風險管理之配水管材選用策略。

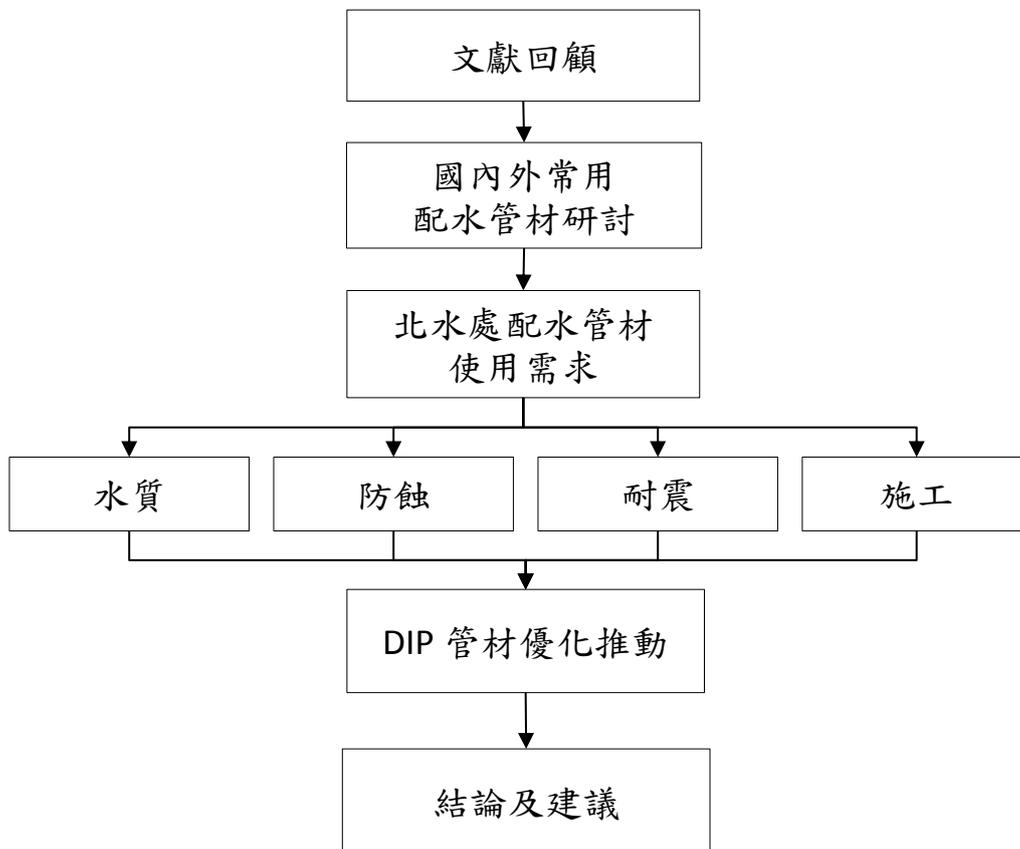


圖1-1 研究流程

1.3 研究方法與預期成果

一、參訪與資料蒐集：參訪自來水管材製造相關產業，包括鑄鐵管材、內襯粉體製造商及相關產業現況與發展趨勢。

二、以評估研究方式，從水質、防蝕、耐震、施工四大需求，探討配水管汰換DIP管時面臨問題，建立一套管材選用可遵循且有效的程序，以達成順利完成配水管汰換之策略。

三、針對水質及防蝕議題中，DIP粉體內襯進行定量分析，包括溶出特性對水質之影響，及粉體塗裝進行附著力試驗，訂定合宜之粉體內襯塗裝檢驗標準及規範。

四、在耐震及施工議題中，採用個案研究，探討NS耐震接頭導入及試用施工技術及材料及後續綜合運用方式。

期望透過探討自來水管材製造相關產業現況與發展趨勢，擬訂汰換DIP配水管之水質、防蝕、耐震、施工四大策略，訂定合宜之粉體內襯塗裝檢驗標準及規範，及施工技術及材料及後續綜合運用方式，建立有效管材選用參考，解決面臨問題，順利完成配水管汰換。

1.4 研究範圍與限制

本研究以北水處鑄鐵管材為主要對象，雖然全臺灣使用鑄鐵管的總量很高，安裝地點也很普遍，然而囿於管網水質、管網操作方式、調度模式、場址差異...，具有高度地域性，不是全部的自來水系統都具有相同狀況，而上述因素對於相同的鑄鐵材料會產生不同的結果，例如內襯吐鹼議題，與所在供水水質有關；接頭耐震議題，與埋設場址效應有關；施工安裝議題，與在地主管機關要求有關，也與在地承造及監造方式有關。

本研究案選用管材僅對於配水管採用DIP管、大小型波狀管及HDPE管進行探討，其餘材質如PVC、HIP、PCCP，及輸水管、給水管等，均無法等同適用。即本研究的範圍為臺北地區鑄鐵配水管材為主，不能一體適用於全臺自來水事業，參考上必須留意。

第二章 文獻探討

2.1 文獻蒐集內容概述

本研究之對象主要為北水處常用的配水管：「鑄鐵管」，研究關注之內容為北水處運用配水管所遭遇的新興議題：「水質」、「防蝕」、「耐震」、「施工」。因此文獻蒐集以鑄鐵管相關文章為主，概述如下：

1.金屬材質：構成DIP延性鑄鐵管的「球墨鑄鐵」發明僅約60年，但傳統「灰口鑄鐵」應用於自來水管卻已超過600年。對於兩種常見但特性不同的鑄鐵金屬，本研究2.2節由材料成分的差異、金相構造、力學行為、加工特性...等面向，以深入淺出方式介紹材料，並稍加比對其他金屬管材特性，如低碳鋼、不鏽鋼，以通盤了解其差異。

2.管壁內襯：由於鑄鐵的電位腐蝕趨勢較高，因此不論是灰口鑄鐵管CIP、球墨鑄鐵管DIP，於160年前便開始進行管壁內襯防蝕保護，由柏油瀝青塗佈、水泥砂漿塗敷、常溫液態加密封塗層、到現在的熱固性粉體塗裝...等，蒐集了國外眾多內襯使用經驗，詳2.3節。

3.內襯溶出與強度：管線不論使用何種內襯，雖提供了鑄鐵防蝕保護，但內襯多會釋放微量物質到水中，內襯本身更有剝離四散的問題，於2.4節蒐羅國外各類型內襯對管網水質的影響，並檢視國際間拉拔強度試驗規範、試驗結果，以作為北水處未來自訂規範參考。

4.管線抗震：臺北盆地的地下管線遭逢地震時，會有軟弱土層震波放大、土壤液化的威脅，更有管線橫越可引致大型錯動的活動斷層。本研究蒐集地下管線的震動反應、國內外地震管線損害統計分析、國際間常用耐震接頭運用實績，希望對北水處引進耐震管材有所助益。

2.2 鑄鐵材料的特性及優點

使用鑄鐵作為自來水管材的歷史很悠久，大約650年前就有最早的鑄鐵管運用實績，即便現代冶金技術的突破，陸續有其他新型的鋼鐵材質發展出來，例如鋼管(SP)、不鏽鋼管(SSP)，雖各有擅長，但鑄鐵管也同時在演化，隨著近代材料科學的技術研發之下，不但鑄鐵管的強度、韌性、延展性、耐蝕性有明顯提升之外，加上鑄鐵鑄造冷卻的低收縮率、切削加工低發熱、優異的震波吸收力...等等固有特質，以及先進的內外襯等防蝕處理、耐震接頭的開發，使得鑄鐵管日益彌新，受到全球自來水界的愛用，以下介紹鑄鐵材料的各項特性。

2.2.1 國外各類管材與鑄鐵管使用概況

雖然新興的塑膠材料管材價格便宜，例如PVC、PE、HDPE，但因鑄鐵材質堅韌耐用，全球現存地下配水管線仍以鑄鐵管材為主流，以北美洲為例，詳圖2-1所示，傳統灰鑄鐵管(CI)及延性鑄鐵管(DI)兩者長度合計約17,000英里，占比超過50%以上，而PVC則異軍突起，增加最快，目前埋入長度約9,000英里，占總長的25%。若將北美洲細分為9個區域，詳圖2-2，除了加拿大的第9區、加州及內華達州的第2區、德克薩斯等6州的第5區，使用PVC的比例較高，其他均以鑄鐵管類的CI+DI為最大宗，甚至第6區(新英格蘭)及第7區(五大湖區)各州現有使用中的鑄鐵管占比超過9成以上。

AWWA也有類似的管材調查，詳圖2-3，將美國分為四大區域，並蒐集各水公司的歷史資料，由1870年起，以10年為一個統計區間，將配水管區分為6英吋、6~10英吋、10英吋以上，做出矩陣變遷圖，並線性外插到2030年，可看出配水管材質運用的趨勢。在1930年代以前唯一的選項就是傳統鑄鐵CI，而且為無內襯的裸管，之後為了防止內壁銹蝕長瘤，採用水泥內襯灰鑄鐵管(CICL)，一直使用到1960年代才逐漸被延性鑄鐵管(DI)及塑膠管

(PVC)取代，也短暫於1950~1970採用石綿管(AC)。AWWA也預測10英吋以下的配水管，未來將是DI及PVC的天下，而10英吋以上的配水管則有15~20%的比例為鋼管、20%為預力混凝土管(PCCP)及水泥管。

2001年德國也有全國性的管線材質調查，詳表2-1所示，全德國既存配水管長度47,619公里，其中灰鑄鐵管最長，為21,173公里，其次為延性鑄鐵管，為13,958公里，兩者合計占比約74%。統計數據指出，鋼管是德國境內漏水最嚴重的管材，每100公里高達33處，其次為灰鑄鐵的27處，而延性鑄鐵管則是最不易漏水的管材，每100公里僅有3處漏水，顯示球墨鑄鐵材質優異的耐用特性，因此即便新的HDPE管材價格便宜，但德國仍持續採用延性鑄鐵管。

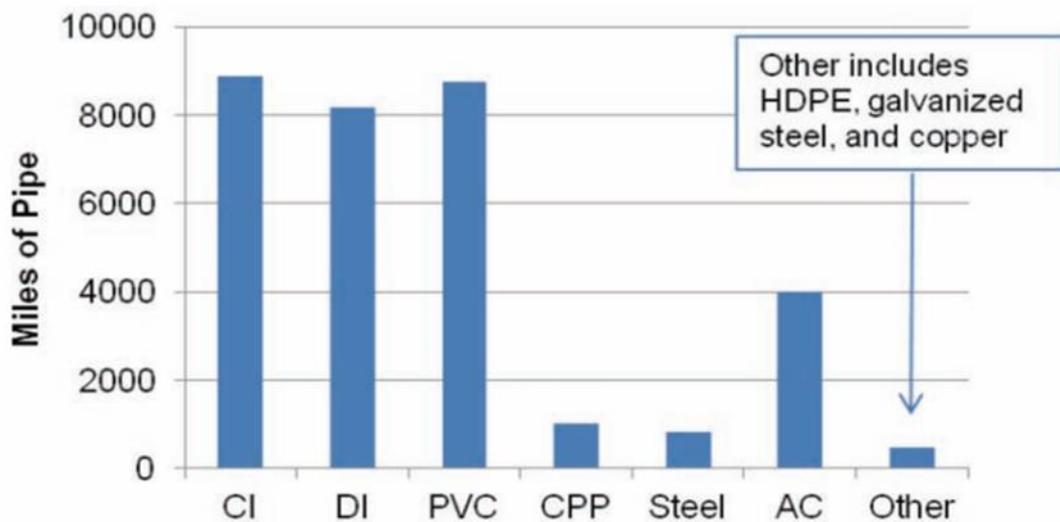


圖2-1 北美洲(美國及部分加拿大)的既存管線長度¹

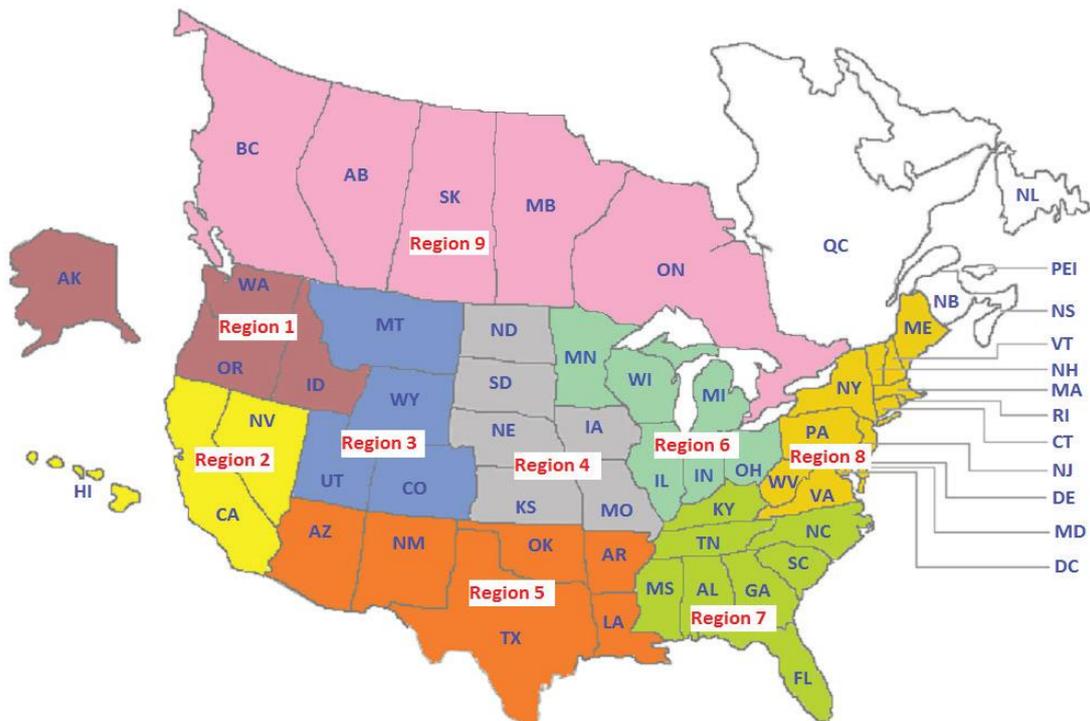
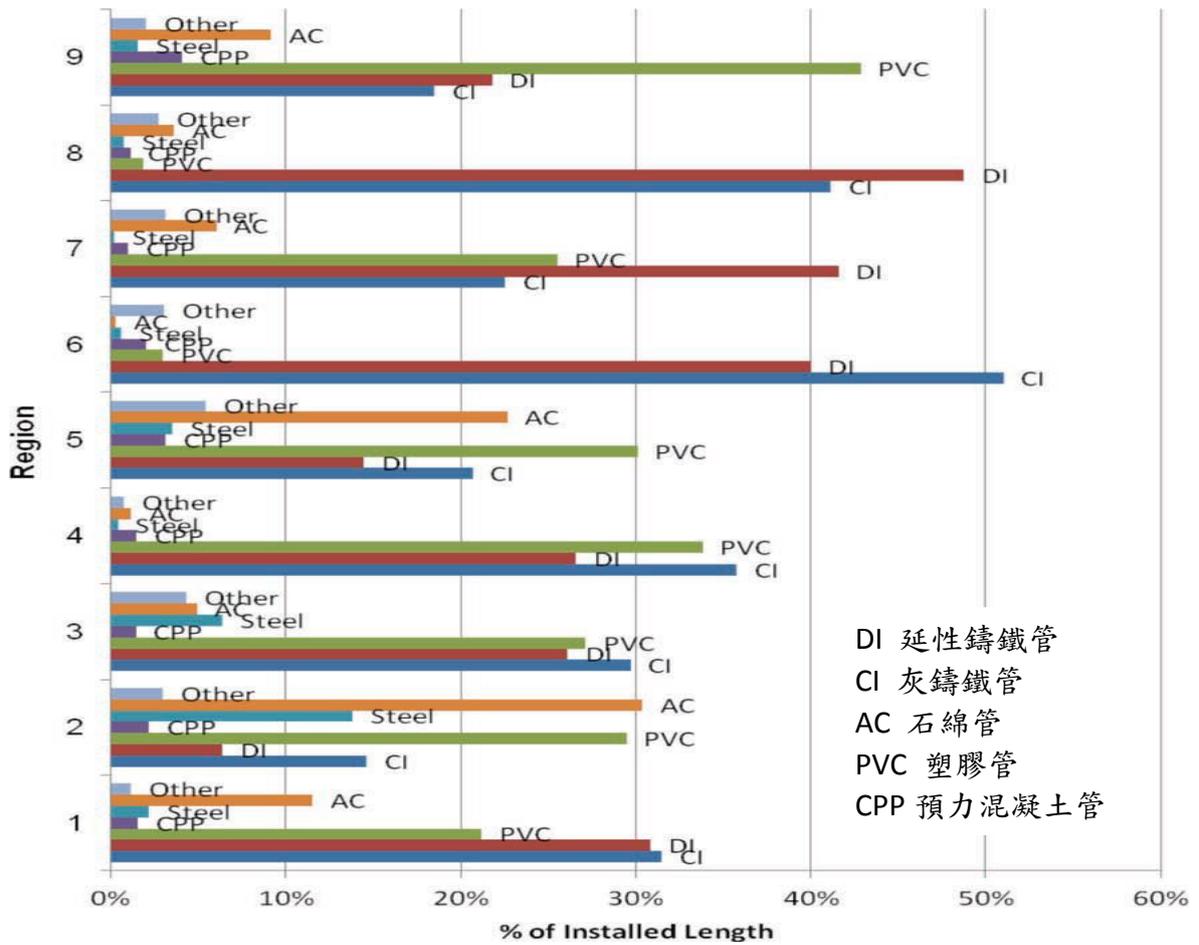


圖2-2 北美洲9個地區的既存管線比例¹

「美國中西部+東北部」各類管材自1870年起，預估到2030年的比例變化：

	CI	CICL (LSL)	CICL (SSL)	DI (LSL)	DI (SSL)	AC (LSL)	AC (SSL)	PVC	CI	CICL (LSL)	CICL (SSL)	DI (LSL)	DI (SSL)	AC (LSL)	AC (SSL)	PVC	CI	CICL (LSL)	CICL (SSL)	DI (LSL)	DI (SSL)	AC (LSL)	AC (SSL)	Steel	Conc & PCCP
	<6 inch diameter								6-10 inch diameter								>10 inch diameter								
1870	100%								100%								100%								
1880	100%								100%								100%								
1890	100%								100%								100%								
1900	100%								100%								100%								
1910	100%								100%								100%								
1920	100%								100%								100%								
1930	50%	30%	20%						50%	30%	20%						50%	30%	20%						
1940	20%	60%	20%						20%	60%	20%						20%	40%	20%					20%	
1950		60%				20%	20%			60%				20%	20%			40%					10%	20%	30%
1960		50%			10%	20%	20%			50%			10%	20%	20%			35%			5%	10%	20%	30%	
1970		20%			40%			40%		20%			40%			40%				5%	10%	20%	30%		
1980				25%	30%			45%				25%	35%			40%				60%		15%	25%		
1990				50%	5%			45%				50%	5%			45%				60%		15%	25%		
2000				55%				45%				55%				45%				60%		15%	25%		
2010				55%				45%				55%				45%				60%		15%	25%		
2020				55%				45%				55%				45%				60%		15%	25%		
2030				55%				45%				55%				45%				60%		15%	25%		

Steel and PCCP pipe not in widespread use in sizes under 10 inches.
 CI: cast iron, CICL: cast iron cement lined, DI: ductile iron, AC: asbestos cement, PV: polyvinyl chloride, PCCP: prestressed concrete cylinder pipe

「美國西部+南部」各類管材自1870年起，預估到2030年的比例變化：

	CI	CICL (LSL)	CICL (SSL)	DI (LSL)	DI (SSL)	AC (LSL)	AC (SSL)	PVC	CI	CICL (LSL)	CICL (SSL)	DI (LSL)	DI (SSL)	AC (LSL)	AC (SSL)	PVC	CI	CICL (LSL)	CICL (SSL)	DI (LSL)	DI (SSL)	AC (LSL)	AC (SSL)	Steel	Conc & PCCP
	<6 inch diameter								6-10 inch diameter								>10 inch diameter								
1870	100%								100%								100%								
1880	100%								100%								100%								
1890	100%								100%								100%								
1900	100%								100%								100%								
1910	100%								100%								100%								
1920	100%								100%								100%								
1930	50%	30%	20%						50%	30%	20%						50%	30%	20%						
1940		70%	30%							70%	30%							50%	30%					20%	
1950		25%				40%	35%			25%				40%	35%			40%					15%	25%	20%
1960		25%		2%	3%	40%	30%			25%		2%	3%	40%	30%			40%			5%	10%	25%	20%	
1970		10%		10%	10%	40%		30%		10%		10%	10%	40%		30%				45%	10%	25%	20%		
1980				25%	25%			50%				30%	30%			40%				60%		20%	20%		
1990				45%	5%			50%				50%	5%			45%				60%		20%	20%		
2000				50%				50%				50%				50%				60%		20%	20%		
2010				50%				50%				50%				50%				60%		20%	20%		
2020				50%				50%				50%				50%				60%		20%	20%		
2030				50%				50%				50%				50%				60%		20%	20%		

Steel and PCCP pipe not in widespread use in sizes under 10 inches.
 CI: cast iron, CICL: cast iron cement lined, DI: ductile iron, AC: asbestos cement, PV: polyvinyl chloride, PCCP: prestressed concrete cylinder pipe

DI=延性鑄鐵管、CI=灰鑄鐵管、AC=石綿管、PVC=塑膠管、PCCP=預力混凝土管、CICL=水泥內襯灰鑄鐵管。LSL=使用壽命長、SSL=使用壽命短(現地及施工因素)



圖2-3 美國4個地區的管線使用比例變遷與預測²

表2-1 德國各類管線長度、總漏水案件及每百公里漏水件數³

	Documented length (km)	Documented incidents (number)	Damage rate number per 100 km
Cast iron pipes	21173	5658	27
Ductile cast pipes	13958	375	3
Steel pipes	4799	1602	33
PE pipes	1350	250	18
PVC pipes	4072	183	4
Galv. pipes	2267	503	22
Total	47619	8571	18

2.2.2 鑄鐵材料成分及微構造

鑄鐵的成分主要為鐵，但微量的碳及其他雜質成分卻會顯著影響其性質，其中碳的比例、形狀、以及基地的金相組織最為關鍵，通常以碳當量及金相微構造作為鑄鐵種類之主要區分指標。

碳當量：鑄鐵成分除了鐵與碳組成外，尚包含矽、錳、磷、硫...等雜質，在鑄鐵的所有成分當中，以碳與矽的影響最為重要，詳圖2-4所示，其中IIb的普通鑄鐵也稱為「灰口鑄鐵」(Gray Cast Iron)，因為黑色的碳以片狀石墨型態分布於基地組織中，材料斷口面呈現灰黑色，故得其名，由於游離的石墨材質軟，因此灰鑄鐵的硬度低，易於切削。至於矽成分較低的I類鑄鐵，稱為「白鑄鐵」(White Cast Iron)，係因缺少矽的作用，鐵水冷卻過程碳無法單獨析出，與鐵化合成碳化鐵(Fe_3C)的基地組織，為白亮的滲碳體(Cementite)，另有按照發音及外觀譯為雪明碳鐵一詞，該類鑄鐵材質呈現輝白色，硬度極高甚難切削。若要作為管材之用，以IIb類鑄鐵性質最佳，其基地組織不含雪明碳鐵，而是以波來鐵(Pearlite)、肥粒鐵(Ferrite)兩種鐵的成分所構成，硬度雖不如白鑄鐵，但延展性與抗拉強度卻更優，但其外觀如同II波來鐵鑄鐵，呈現灰色，除非以顯微鏡觀察組織才能分辨兩者差別，而II類鑄鐵顧名思義，只有波來鐵，石墨則均勻分布其中。

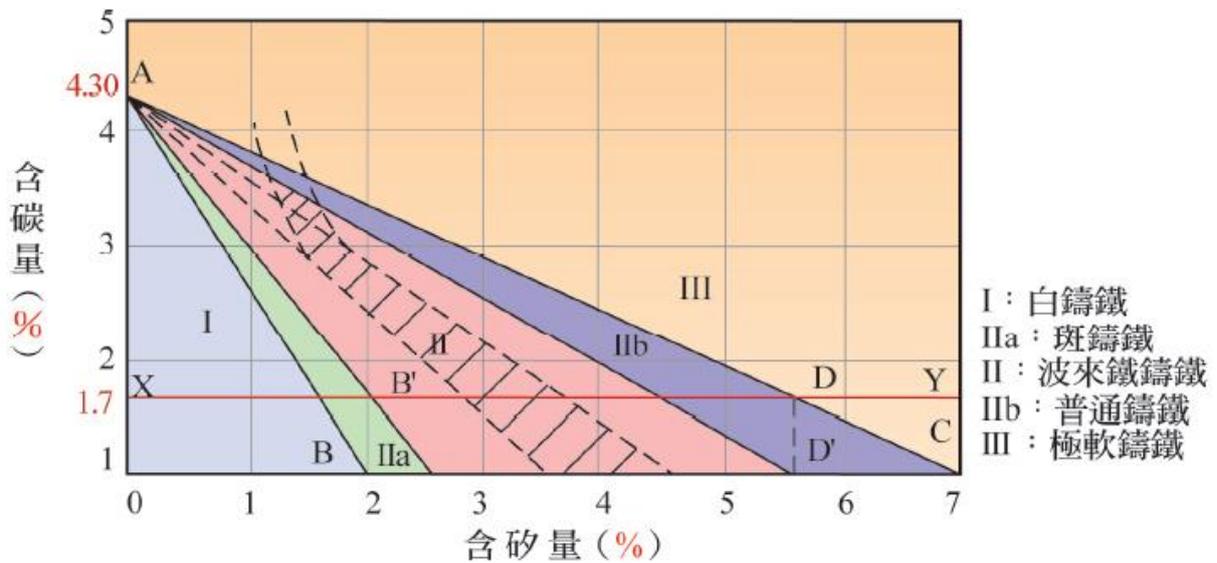


圖2-4 碳及矽含量對鑄鐵組織的影響⁴

IIb的灰鑄鐵對應到的CNS標準，為FC100、FC150、FC200，後方的數字即為抗拉強度，單位為MPa。II類波來鐵鑄鐵又稱為高級鑄鐵，CNS對應名稱為FC250、FC300、FC350，因為具有適當之強度又耐磨，也不至於太脆，因此適合用於製造汽缸、活塞等引擎構件。

I白鑄鐵：波來鐵、雪明碳鐵

IIa斑鑄鐵：波來鐵、雪明碳鐵、石墨

II波來鐵鑄鐵(高級鑄鐵)：波來鐵、石墨

IIb灰口鑄鐵(普通鑄鐵)：波來鐵、肥粒鐵、石墨

III軟鑄鐵：肥粒鐵、石墨

由於碳、矽不同的比例所形成的鑄鐵種類也不同，故鑄造廠使用「碳當量」(Carbon equivalent, CE)來控制鐵水成分，CE愈大，硬度增加，但延展性、抗拉強度卻隨之降低(詳圖2-5)，而且材料變得更為脆性。除了碳、矽之外，磷也有所影響，因此碳當量的公式有兩種寫法： $CE = C\% + 1/3(Si\%)$ 或 $CE = C\% + 1/3(Si\%+P\%)$

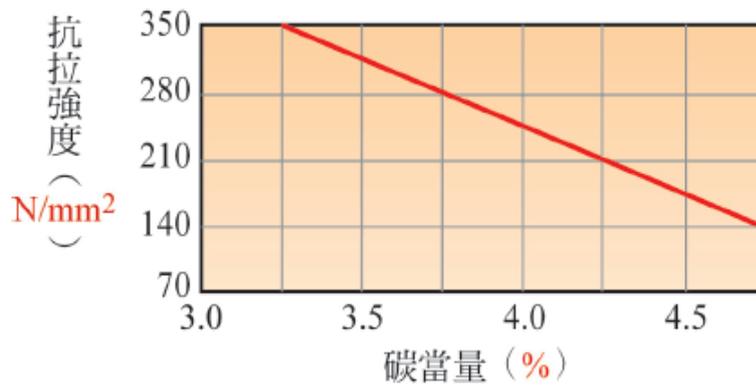


圖2-5 FC灰口鑄鐵碳當量與抗拉強度的關係⁴

鑄鐵的鐵水原料：雜廢鐵、廢鋼料、生鐵塊，過去使用鼓風爐(高爐)，還必須加入約10~20%重量的燃料(焦炭)，以及4%重量的熔劑(石灰石)。點火後，空氣由鼓風口吹入，讓焦炭燃燒，熱氣上竄使得原料熔化，之後鐵水由出鐵口流出，石灰石除了助熔的功能之外，還能吸附爐內雜物形成輕質爐渣，浮於鐵水表面，再由出渣口排出。(如圖2-6)

然而傳統鼓風爐不易控制鐵水的微量成分，如果要摻入其他元素製造合金鑄鐵或特殊鑄鐵，則力有未逮，而且鼓風爐產生嚴重的空氣污染，目前多以電爐(如圖2-7)取代鼓風爐，使用電爐加熱不必使用焦炭作為燃料，雜質減少對鐵水成分配比的影響也大幅降低。

國內某鑄造廠也使用電爐煉製鐵水，可精準控制成分配比，由於圖2-4的IIb鑄鐵區間很窄，因此廠內不時對爐水取樣進行成分分析，以確保澆置出來的鑄鐵管化學元素成分受到控制，詳圖2-8所示，該成分係取爐水製成小鐵塊樣品後，以雷射汽化金屬表面，氣體通過分光儀檢測成分，數據顯示，含碳量為3.604%，矽1.351%，磷0.042%，所計算之碳當量CE為4.055%，確實落於IIb灰鑄鐵的成分區間內。

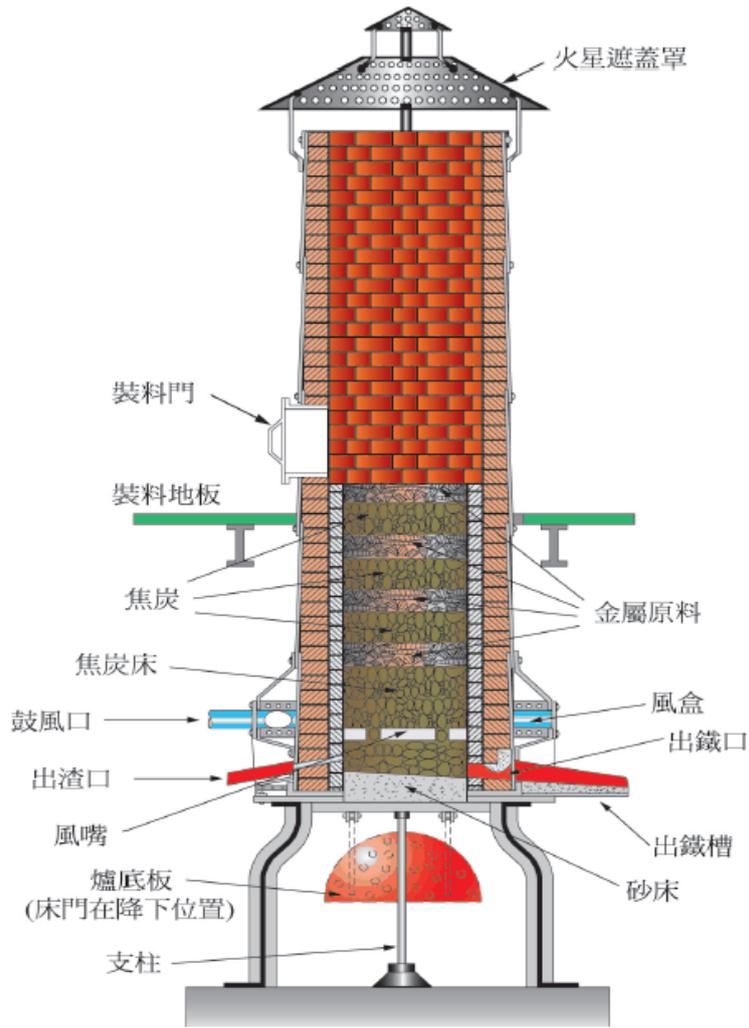


圖2-6 鼓風爐的構造與製鐵原料分層堆置情況⁴

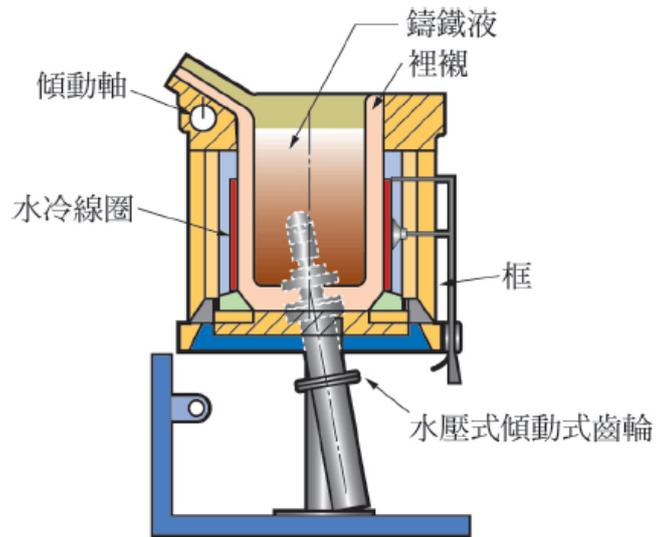


圖2-7 低週波感應電爐的構造⁴

Program: FECAIK Elements: 21 Date: 2018/3/16										
Time: 09:03:40 上午 Sample ID 1: TEST Runs: 1										
Runs in Average: 1										
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Mo	Ni	V
Avg	3.60442	1.35107	0.36747	0.04195	0.02518	0.00040	0.03449	0.00168	0.01569	0.00581
<input checked="" type="checkbox"/> 1	3.60442	1.35107	0.36747	0.04195	0.02518	0.00040	0.03449	0.00168	0.01569	0.00581
	Al	Cu	Ti	Nb	W	As	Sn	Co	Pb	FE%
Avg	0.00109	0.02270	0.00847	0.00289	0.00000	0.00174	0.00210	0.00252	0.00309	94.5072
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0.00109	0.02270	0.00847	0.00289	0.00000	0.00174	0.00210	0.00252	0.00309	94.5072
	CE									
Avg	4.055									
<input checked="" type="checkbox"/> 1	4.055									

圖2-8 國內某鑄造廠鐵水樣品之成分比例

球狀石墨：歷史上有記載最早使用的球狀石墨鑄鐵管為1668年法國由塞納河輸送至凡爾賽宮的21公里鑄鐵管，350年來僅部分接頭及管件維修更換，主管線迄今仍在使用中。球狀石墨鑄鐵管開始大量工業規模生產，要到20世紀中葉才開始，1947年英國H.Morrogh發現，在過共晶灰口鑄鐵中附加鈣，使其含量在0.02wt%以上時，石墨呈球狀析出散佈於基體組織。1948年美國A. P.Ganganabin等人研究指出，在鑄鐵中添加鎂，隨後用矽鐵孕育，當殘餘鎂量大於0.04wt%時，即可得到球狀石墨⁵。鐵水經過添加球化劑之後，注入高速離心鑄造機成形的管材，就稱為球墨鑄鐵管，即便碳當量及微量元素成分配比不變，保有灰口鑄鐵的化學抗蝕性、鑄造收縮率低、易切削加工性、吸收震動性...，但由於灰口鑄鐵的組織發生改變，力學特性獲得顯著提升，延展性、抗拉性均優於灰口鑄鐵，甚至接近結構用碳鋼的力學行為，可「以鐵代鋼」，因此球墨鑄鐵管成為最理想的管材。

球墨鑄鐵必須在爐水狀態下，在澆盆內加入含鎂的球化劑，鎂劑因為具有與氧、硫的強力親和作用，接觸鐵水當下發生除氧脫硫現象，促使凝固過程石墨形成圓球狀。但生產作業過程中必須控制鐵水的化學成分、時間、溫度等，否則又會恢復成原來的片狀石墨。因為經球化處理之鐵水鎂含量會隨時間減少，當鎂含量低於0.0224%時球狀石墨將會改變形狀。尤其

是漂浮在鐵水上的硫化鎂還會分解回鎂及硫，鎂容易揮發掉，當硫回到鐵水中將促使球墨退化成片狀。圖2-9可查看球狀石墨與片狀石墨組織構造明顯不同。

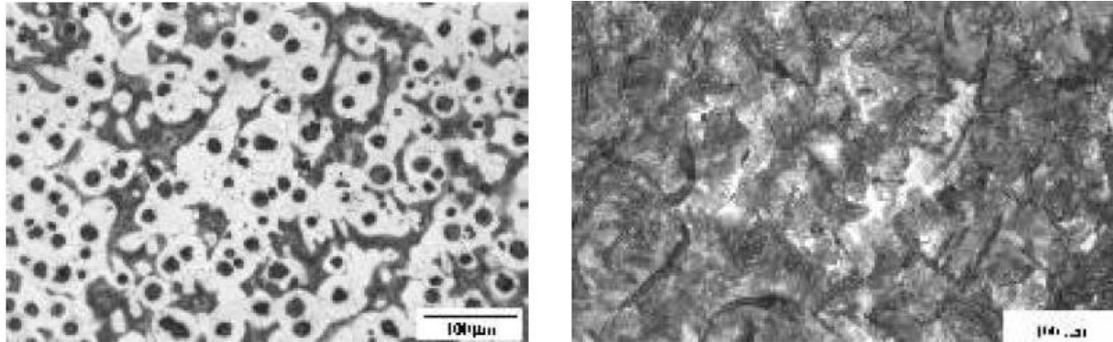


圖2-9 球狀石墨(左)、片狀石墨(右)組織構造⁶

微組織構造：冷卻後的球墨鑄鐵，依照球化率、鑄鐵金相給定不同等級分類，兩者的些微差異將影響著鑄造品的力學行為，碳當量的高低會左右鑄鐵金相，球化處理的良窳則會影響球化率。鑄鐵金相因基地組織(Matrix Structure)的不同可分為多種形態，以自來水管用的球墨鑄鐵管，最常用的有兩類，詳圖2-10：

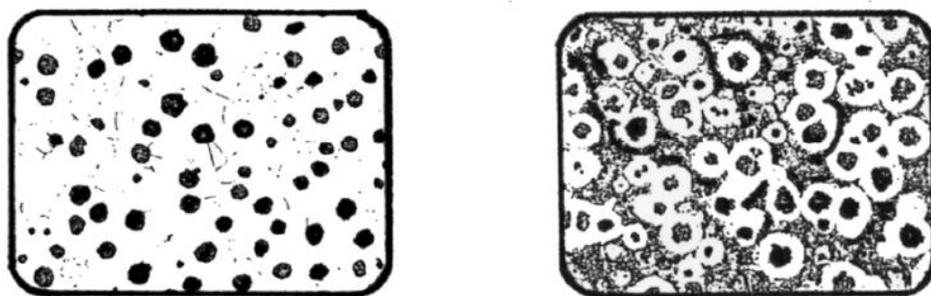


圖2-10 肥粒鐵基地(左)、肥粒鐵+波來鐵基地(右)球墨鑄鐵¹

1.肥粒鐵基地-球墨鑄鐵：圖2-10左圖，當摻入較高比例的矽，鐵水冷卻時，基地組織全部轉化為肥粒鐵，將碳吐出成為石墨，由於基地組織全部為幾乎不含碳的肥粒鐵(最多只能溶進約0.02%的碳)，可視為純鐵，延展性很好，因此鑄鐵的抗拉與降伏強度與低碳鋼相當。此類的球墨鑄鐵約為CNS的FCD 370~FCD 450規格(數字為抗拉強度MPa)，或ASTM的60-40-18

~65-45-12規格。註ASTM的規格記號為：抗拉強度(ksi)-降伏強度(ksi)-伸長率(%)。

2.肥粒鐵+波來鐵基地-球墨鑄鐵：圖2-10右圖，當摻入的矽略少，冷卻時不足以驅趕所有的碳成為石墨，部分碳與鐵形成碳化鐵(雪明碳鐵)，並且與純鐵(肥粒鐵)層狀堆砌形成了波來鐵組織(整體含碳量約0.8%)，顏色較深，淺色的肥粒鐵則圍繞著被吐出的石墨，形成牛眼組織(Bull's Eye Structure)，為最容易觀察的金相特徵，由於波來鐵較為堅硬，雖然提供了更大的抗拉強度，但卻減損了延展性。此類的鑄鐵為CNS的FCD 500~FCD 600規格，或ASTM的80-50-06。

至於基地組織為純波來鐵、或參雜雪明碳鐵的球墨鑄鐵(圖2-11)，雖然抗拉強度更高，但因為延展性較低，通常不做為自來水管件，而是作為引擎構件、汽缸、曲柄軸...等，例如CNS的FCD 700，相當於ASTM的100-70-03，雖然抗拉強度高達700 MPa，但伸長率僅有3%。

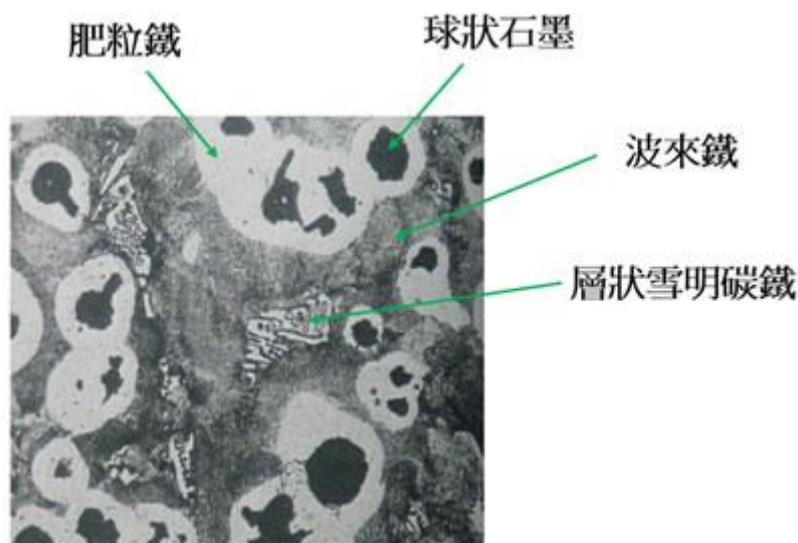


圖2-11 球狀石墨鑄鐵的典型組織構造⁷

國內球墨鑄鐵管的規範多要求提供FCD 400以上的鑄鐵，但有些採購規範則由力學特性上列出要求，例如抗拉強度43 kgf/mm²以上、伸長率10%以

上、勃式硬度230 HB以下、球化率70%以上，因此鑄造商控制碳當量與矽的配比，使得成品趨近於肥粒鐵為主、波來鐵少量的基地組織，詳圖2-12所示，其力學特性方能符合採購規範要求。



圖2-12 國內某鑄造廠的球墨鑄鐵金相照片

球化率是鑄鐵重要的品質參數，球化率愈高者力學行為愈佳，由於涉及目視及人為辨識，判讀結果會稍有差距，國際間也有標準圖供依循，例如，日本JIS G5502-2001定義的球化率辨識法則，係以ISO 945建議的六類石墨顆粒形狀為基礎(圖2-13)，其計算公式為：

$$\text{球化率} = \frac{(\text{等級V顆粒數} + \text{等級VI顆粒數})}{\text{總顆粒數}}$$

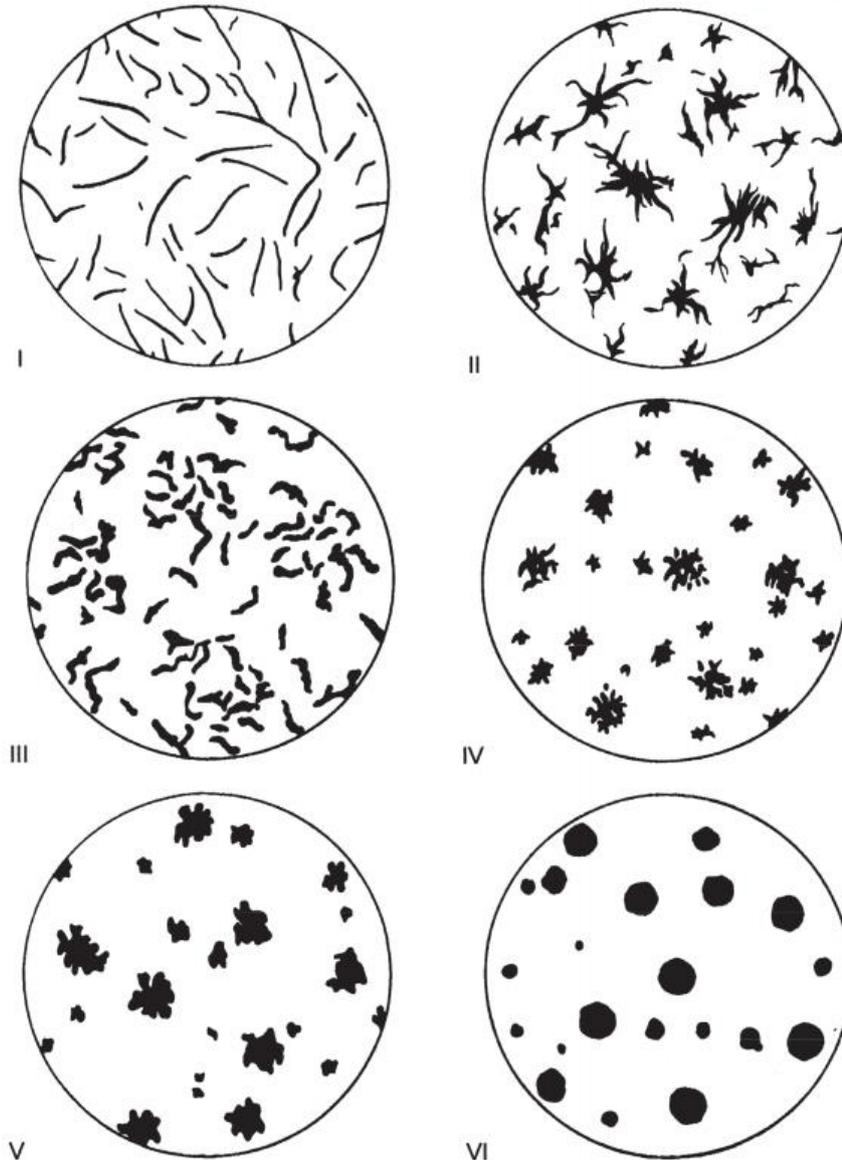


圖2-13 ISO 945石墨顆粒形狀的等級⁹

以肉眼辨識仍有不客觀的問題，因此透過影像辨識軟體，如圖2-14所示，自動擷取畫面中的石墨形狀，比對標準圖後給定等級，並套用各國的球化率計算式。國內CNS 2869 B 2118也有判定的規則，係以顯微組織照片放大100倍，觀察5處求取平均值。太小的石墨(小於15 μm)則不予計入，參考圖例則引用ISO 945-1的圖片，球化率計算方法也比照JIS，以型態等級V及VI作為計算基準。

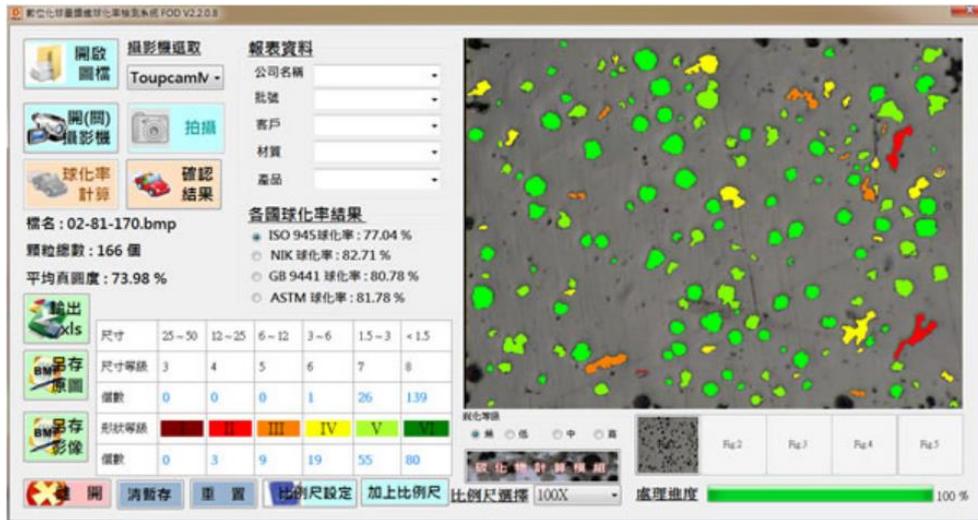


圖2-14 以影像辨識軟體判讀球化率⁷

2.2.3 與其他金屬管材之力學行為比較

應力應變曲線：評定金屬的力學行為(Mechanical Behaviours，或另譯為機械特性)，最重要的方法就是將該金屬磨成試棒，施以拉力測試直到斷裂，過程中紀錄所施加的力量F與試棒的變形d，可正規化為單位面積受力:應力 Stress (σ)、以及單位長度的變形:應變 Strain (ϵ)，也就是應力-應變曲線， σ - ϵ Curve，如圖2-15所示。

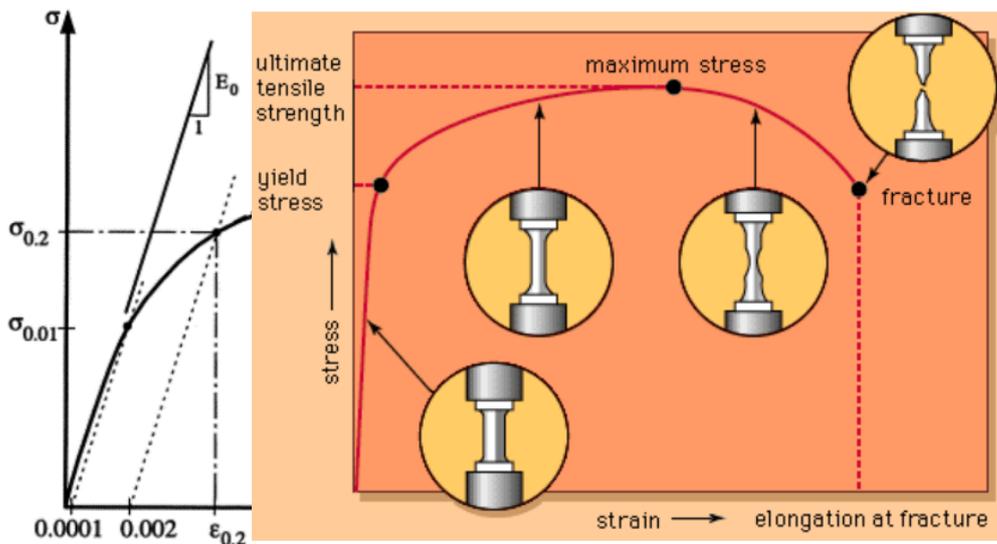


圖2-15 應力-應變 σ - ϵ 曲線(右圖)及小應變範圍局部放大(左圖)¹⁰

重要特徵：1.曲線的斷裂終點為材料的破裂應力(Fracture Stress)，2.曲

線最高點為抗拉強度 (Tensile Strength)，3. 初始直線結束點為PL點 (Proportional Limit)代表材料若再變形下去就進入塑性區，回不去了，4. 如果初始直線段不明顯，以應變0.2%對到的應力作為降伏強度 (Yield Strength)。透過曲線小應變區間的線性段，可一窺材料受力下的彈性、塑性的範圍。由斷裂點的應變大小，能夠判斷材料是否屬於脆性材料，由降伏後的應變區間寬度，更可一窺材料延展能力...等力學特徵，因此應力應變曲線是材料檢驗、產品驗收的重要依據。

相同微量元素之配比的灰口鑄鐵與球墨鑄鐵，唯一的差別在於石墨一個為片狀 (Flake)，另一個為球狀 (Spheroidal)，但力學行為卻有極端差距，圖 2-16 所示，灰口鑄鐵 FC 250 的應力應變曲線大約在應變 2% 附近就斷裂，屬於脆性材料，球墨鑄鐵 FCD 350 卻可伸展到 25% 的變形才斷裂，延展性幾乎能媲美結構用低碳鋼 SS 400，抗拉強度、破裂應力、降伏強度也僅略低於碳鋼，也就是足可「以鐵代鋼」。

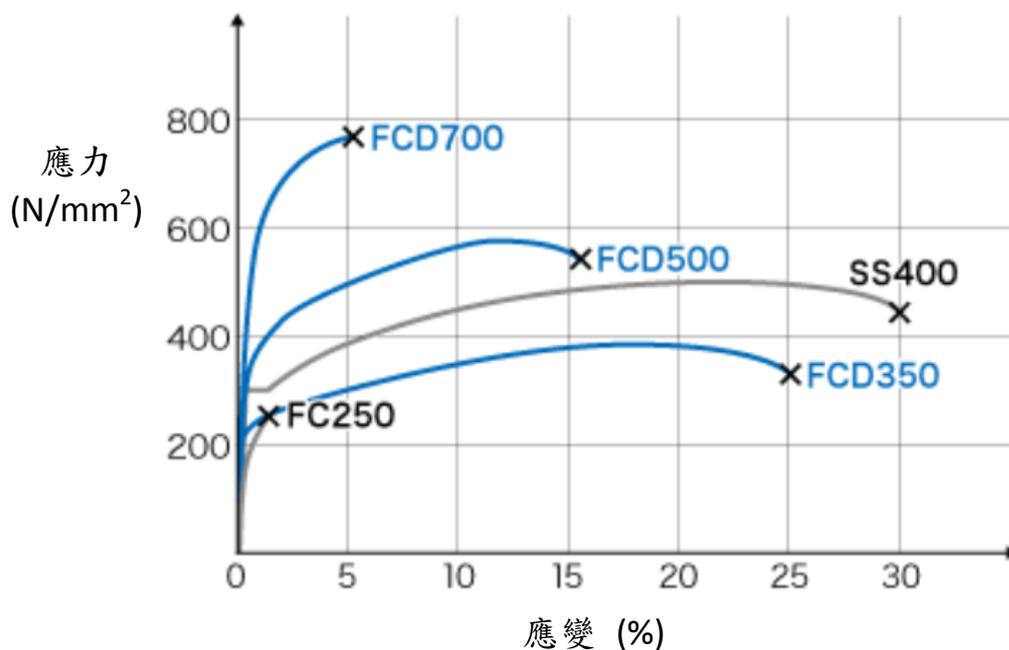


圖 2-16 灰口鑄鐵(FC).球墨鑄鐵(FCD).低碳鋼(SS)的 σ - ϵ 曲線¹¹

然而延性鑄鐵的延展性與抗拉強度卻無法兼顧，抗拉強度較高的 FCD

500伸長率卻很快掉到15%，強度更高的FCD 700更是萎縮到只剩5%，此時力學行為的主導因子與球化率無關，而是基體組織由強度低但延展性佳肥粒鐵，逐漸替換成高強度但質地脆的波來鐵所致。

以肥粒鐵為基體的球墨鑄鐵FCD 350~FCD 500進行拉力試驗時也與低碳鋼SS 400具有相同「縮頸」(Necking)的行為，也就是材料達到最大強度並不會斷裂，而是持續變形，但拉力開始下滑，此時材料斷面積開始縮小，外觀如同頸部，最後才斷裂，詳圖2-15所示，為延性材料普遍的特點，然而FCD 700雖也稱作延性鑄鐵，但其應力應變曲線卻沒有先縮頸就直接斷裂，反而較像脆性材料。

材料的彈性行為：圖2-16係以應變由0~30%的尺度來觀察並描述材料的抗拉強度、延展性等行為，可了解材料的極限狀態，然而許多材料並不會在如此高的工作應力下使用，變形也控制在很小的尺度下，在受力釋放後能夠彈性恢復到原來的狀態下，材料才不至於產生永久變形。若要觀察上述小尺度的變形力學行為，必須將應力應變曲線局部放大，將介於0~1%的應變區間展開來看，由曲線的形狀特徵分析微小變形的力學行為，才能辨識屬於彈性(Elastic)或是彈塑性(Elastoplastic)材料。

圖2-17就是將圖2-16小應變區間局部放大而來，很明顯發現圖中的軟鋼(低碳鋼SS 400的別稱)與灰口鑄鐵(FC 250)、球墨鑄鐵(FCD 350、FCD 500)，在0.2%以內小變形的應力應變曲線不一樣，碳鋼為一直線，但三種鑄鐵都是曲線，代表低碳鋼為完美的彈性體，鑄鐵只有在PL以下才是彈性體，當受力超過PL，力量釋放後，變形不會恢復原狀，而是發生殘留的永久變形。也因為這樣的彈塑特性，為了避免永久變形，鑄鐵必須做的更厚重，或是讓工作應力控制在PL以下更小的區間，而碳鋼則可以用相對輕薄的材料，就能確保都在彈性範圍內承受應力，這也是為何結構用鋼材、鋼筋、鋼板、鋼纜...均使用低碳鋼材料，迄今仍無法以球墨鑄鐵取代的主要原因。而鑄

鐵由於力學上的先天不足，只能做為承受次要應力的非結構用料，或者工作應力遠低於PL的場合，例如引擎構件、水管管材等。

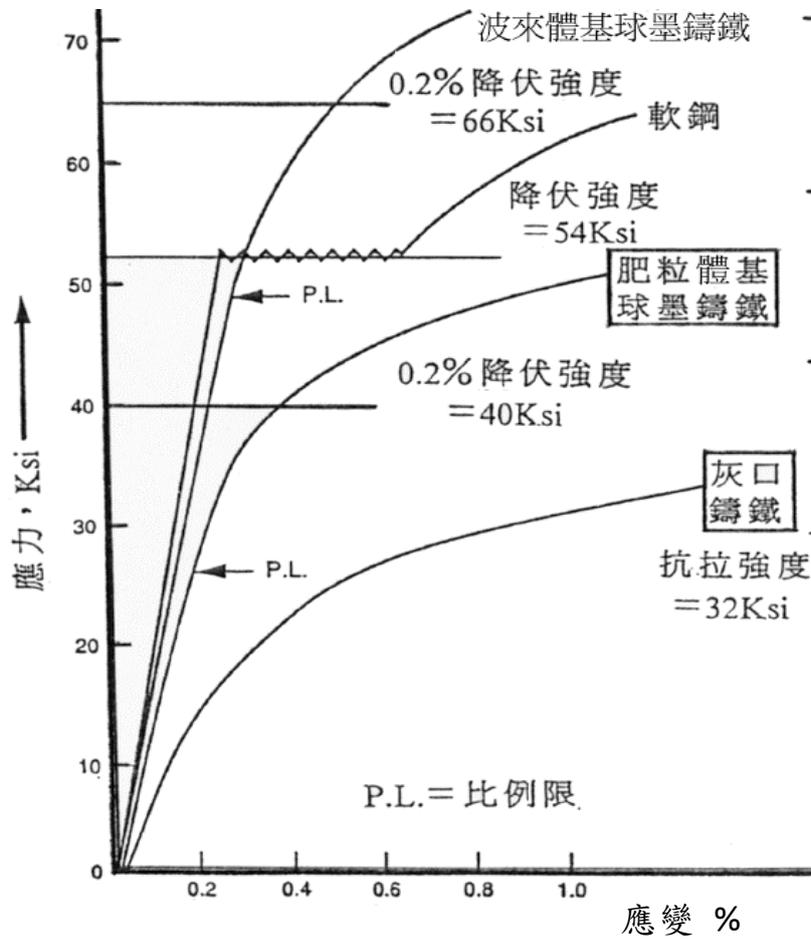


圖2-17 FC、FCD、SS小應變範圍的 σ - ϵ 曲線局部放大⁸

不鏽鋼的力學行為：自來水管用不鏽鋼最常見為3系列的304、316或低碳的304L、316L，兩種材料都是摻入了重量比例16~25%鉻及7~20%鎳的合金。鉻使得表層產生緻密的氧化鉻保護膜，具有抗蝕並隔絕進一步氧化內部的能力。而鎳則讓鐵水冷卻時，金相維持在奧斯田鐵(Austenite)狀態，具有較佳的可塑性、韌性、耐蝕性及成形性。為避免氯離子孔蝕，316不鏽鋼於304不鏽鋼既有成分中額外加入2.5%的鉬來抑制孔蝕現象，因此316不鏽鋼耐蝕性更為優異。

雖然不鏽鋼有上述耐蝕優點，但是力學性質卻不優異，詳圖2-18，於

0.2%(或0.002)的小應變範圍，304L及316L的應力應變與鑄鐵相仿，都是曲線，並非低碳鋼Carbon steel的一直線，抗拉強度更高的雙相型不鏽鋼Duplex 2205(金相為奧斯田鐵+肥粒鐵雙相共存)，也是曲線，代表不鏽鋼在小變形下屬於彈塑性材料，與鑄鐵類似。

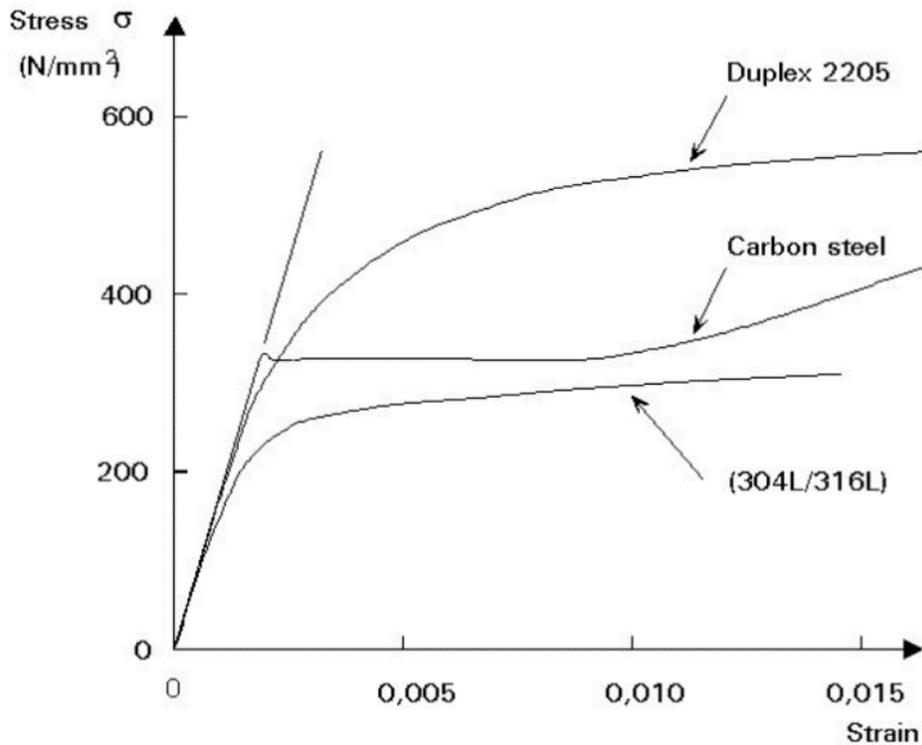


圖2-18 不鏽鋼(SUS).碳鋼(SS)於小應變範圍的 σ - ϵ 局部放大¹²

由於近代結構計算公式都是由彈性力學推導出來的，常見的結構設計軟體也基於彈性材料開發，低碳鋼就是優異的彈性材料，套用計算公式代入軟體毫無困難，然而工程師遇到彈塑性材料卻無法套用前述公式或軟體進行設計，必須改用異常複雜的彈塑性力學，除了難以用手算檢核，軟體也不一定支援。再加上不鏽鋼並非等向性(Isotropic)材料，也就是分別在三個方向對不鏽鋼方塊施加相同拉力，但不鏽鋼的變形居然不一樣，更是添增了力學公式的複雜度，因此鑄鐵、不鏽鋼等材料無法取代低碳鋼的地位。即便低碳鋼很容易生鏽，但結構設計不會出事，在結構安全的考量下，建築物的鋼筋、鋼梁，橋梁的預力鋼纜、箱型樑等承受巨大力量的構件材料，

最後都是採用低碳鋼並對表層防鏽處理，沒有工程師願意冒險使用不鏽鋼或鑄鐵。

自來水管用的不鏽鋼螺栓經常發生「燒結」咬死，就是彈塑材料的另一個缺點，由於螺栓過度用力旋緊，總會在局部產生應力集中，當應力超過彈性界線的PL點，就發生塑性的永久變形，螺栓公母牙變形後就很難退開，但許多工程師以訛傳訛，以為旋太緊使溫度飆高導致材料軟化燒結，事實上溫度遠低於700度，金相根本不會轉變。

2.2.4 鑄鐵之其他特性及優點

低收縮率：鑄造品由液態鐵水開始直到常溫固態的過程，隨著溫度下降，會發生三個階段的體積收縮，即液體隨溫度下降時的「液體收縮」；鐵水凝固期間的「凝固收縮」；以及凝固後金屬冷卻至室溫的「固體收縮」。以含碳量較低的鑄鋼而言，這三個階段的收縮很明顯，詳圖2-19所示，鑄鋼收縮率高達4%，遠比鑄鐵的1%高很多。

鑄鋼因為熔點較高，所以鐵水溫度高於鑄鐵許多，約1400度，同樣冷卻到室溫，其溫降幅度大，以致物理冷縮之收縮率先天就較低溫的鑄鐵鐵水來的大。然而兩者的含碳量及金相轉變機制不同，才是鑄鐵收縮率遠低於鑄鋼的主要原因，低碳的鑄鋼於鐵水凝固期間，原本佔有體積的碳都融入鐵中或形成碳化鐵，更不會析出佔有空間的石墨，因此凝固收縮量很明顯。反之，高含碳量的鑄鐵因為石墨的析出，填充了許多空間，甚至體積還會膨脹，抵銷了凝固期間的物理冷縮量，而且鑄鐵鐵水的溫度較低，約1100度，較快降到室溫，引起的物理收縮量也比較小。因為鑄鐵優異的防縮能力，翻模尺寸不需要放大太多，成形後鑄品較能達到原設計形狀，不會過度縮小變形。

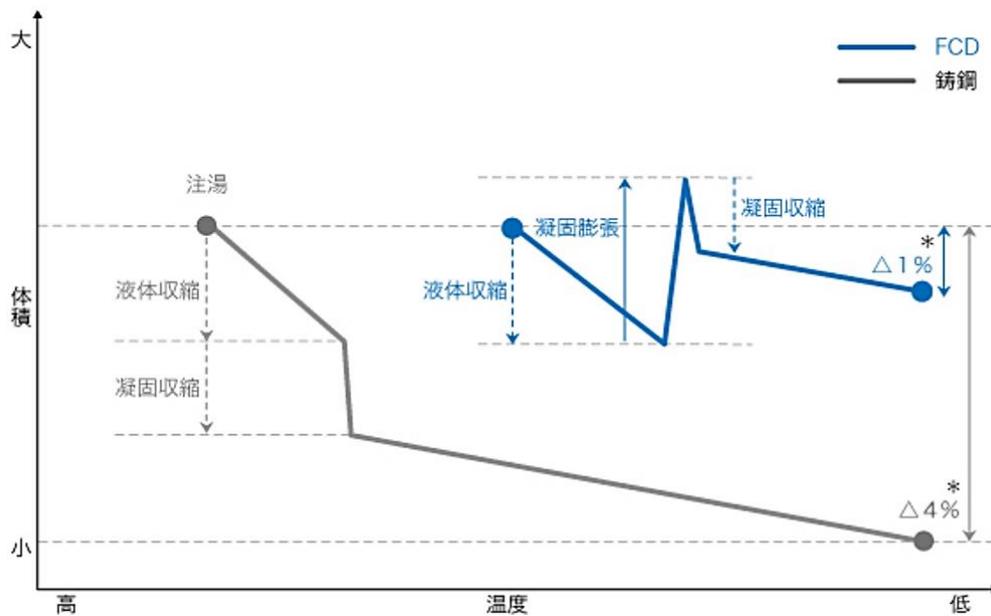


圖2-19 球墨鑄鐵與鑄鋼的澆鑄體積變化比較¹¹

易於切削：鑄鐵金相含有孤立的石墨，與週邊的基體組織特性不同，強度相異，以材料組織力學的觀點，這些石墨形成了弱點，因此對鑄鐵進行切削時，刀刃推除切下的部位會沿著石墨邊界粉碎掉，而且石墨本身具有潤滑的效果，刀刃與鑄鐵高速磨擦時，不會產生過熱現象，甚至不需要額外添加潤滑油，施以「乾切」即可對鑄鐵加工。(詳圖2-20所示)

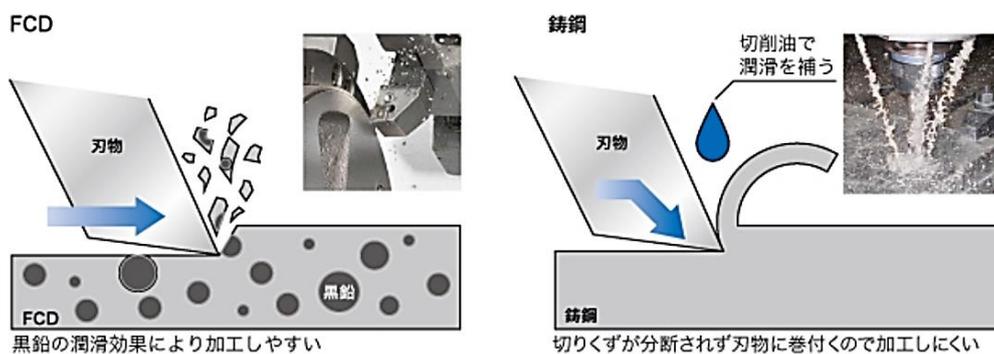


圖2-20 球墨鑄鐵與鑄鋼的切削能力比較¹¹

低碳的鑄鋼為奧斯田鐵、肥粒鐵、波來鐵的金相組織，由於不含石墨，切削缺乏潤滑，而且切下的下腳不會粉碎脫離，而是形成螺旋條狀，過程產生高熱，必須噴注切削油做為潤滑才能保護機具。

耐候性：低碳鋼與鑄鐵的腐蝕電位(corrosion potential)都相同，理論上兩者腐蝕速度應該差不多，但事實上鑄鐵在大氣中的腐蝕速度很緩慢，主要是鑄鐵表層產生了一層較為緻密的氧化膜，形成額外的防護，而低碳鋼則形成結構膨鬆的腐蝕外層，無法阻隔水分入侵發生進一步的腐蝕。兩者的腐蝕速度詳圖2-21所示，一開始表層沒有生成氧化物，兩者的腐蝕速度都較快，但隨著鑄鐵的緻密氧化膜生成後，腐蝕速度就大幅下降，這也是中世紀歐洲的某些鑄鐵迄今仍存之因。

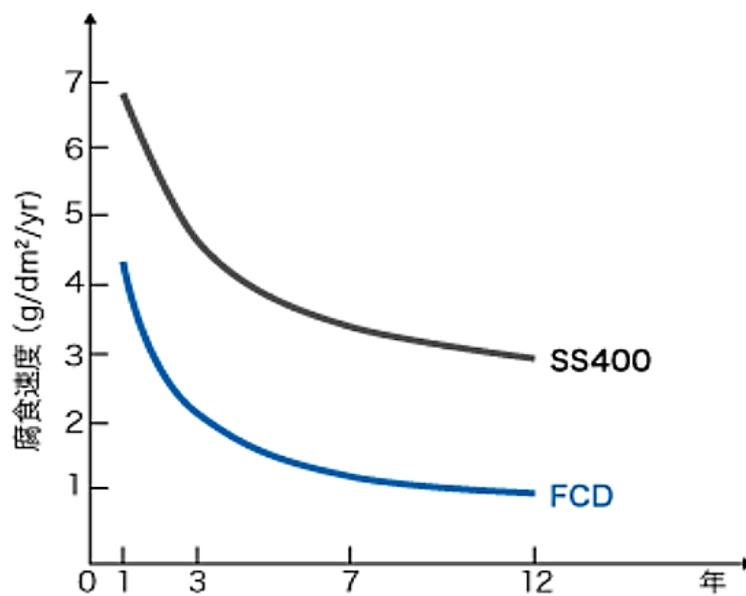


圖2-21 球墨鑄鐵與低碳鋼的腐蝕速度比較¹¹

耐蝕性氧化膜的生成與否，鑄鐵中的矽扮演了重要的角色，而且矽的含量愈高效果愈好，主要是矽氧化後讓表層鏽膜混入二氧化矽，讓這層膜具有很高的電阻率，化學穩定性也很好。此外鑄鐵中額外加入的鎳、鉻、銅、鋁、鈦、釩，也會增加耐腐蝕性，若加入18%以上的鎳，則會讓鐵水冷卻後形成與不鏽鋼一樣的奧斯田鐵基地組織，其腐蝕電位比起肥粒鐵與波來鐵基地更高，較靠陽極側，襲奪電子能力較強，十分耐蝕，稱為高鎳鑄鐵或奧斯田鑄鐵(Austenitic Cast Iron)。

震波吸收能力：鑄鐵金相中獨特的石墨組織，是極佳的阻尼(Damping)

微構造，能夠吸收震波。當振動讓組織產生變形，石墨與基體組織接觸面的微小錯動，很快將振動能量轉換成熱能消耗掉，詳圖2-22所示，金相缺乏石墨的碳鋼(低碳鋼、中碳鋼、高碳鋼)沒有這種內部耗能阻尼機構，振動持續很久才停止，然而振動在球墨鑄鐵中則很快停下來，阻尼約為碳鋼10倍，甚至傳統的灰口鑄鐵，由於片狀石墨的接觸表面積比球墨更大，阻尼是碳鋼的60倍。

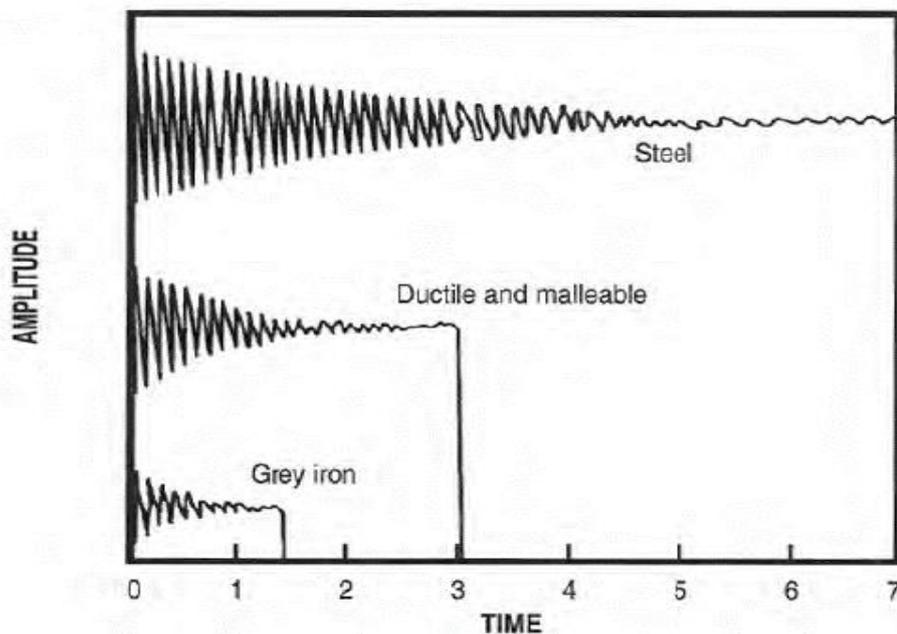


圖2-22 球墨鑄鐵、灰口鑄鐵與低碳鋼的吸震阻尼比較¹³

因此工業界如果要避免機械噪音，最好的選擇就是採用灰口鑄鐵或球墨鑄鐵，例如傳動軸、齒輪、連桿、飛輪、曲柄軸、凸輪軸等轉動構件，改用鑄鐵後，整體振動、噪音均大幅降低。如果擔心灰口鑄鐵太過脆性，需要強度及韌性兼具的構件，則可改用球墨鑄鐵，甚至是經過熱處理優化過的球墨鑄鐵。透過空氣爐加溫900度以上回火處理的球墨鑄鐵，肥粒鐵基體轉化成為變韌肥粒鐵及奧斯田鐵，稱為「奧斯回火球墨鑄鐵」(Austempered Ductile Iron, ADI)，不但保留球墨結構，而且基體組織經過強化，抗拉強度由850 MPa到1600 MPa，伸長率可從2%~15%，因此自1970年代起陸續有機械製造商採用ADI鑄鐵製造低噪音機械。

耐磨損性：鑄鐵的石墨組織除了讓鑄鐵外觀呈現灰黑色，這些外露的石墨更是具有潤滑的效果，因為石墨本身很光滑，摩擦係數很低，當另一塊金屬靠著鑄鐵滑動時，這些石墨將扮演降低機械阻力的功能，避免表面長時受到磨擦剪力，日久互相磨損刮傷。

汽缸、活塞、工具機床面等場合，如果使用鑄鋼，因為金屬表面缺乏外露的石墨，來回滑動將很快發生「凝著磨耗」的現象，詳圖2-23，不但溫度升高，金屬摩擦阻抗明顯提高，若缺乏額外潤滑劑，兩塊金屬如同黏在一起之後再強硬錯開，摩擦力引起的表面剪應力會刮壞金屬表面，造成損傷。

如果改使用鑄鐵，又添加潤滑油，石墨會吸附潤滑油並具有儲油的功能，當每次相對運動經過石墨表面，都能刮出一點潤滑油，讓介面很均勻的潤滑，有效降低磨擦剪應力，避免表層磨損。

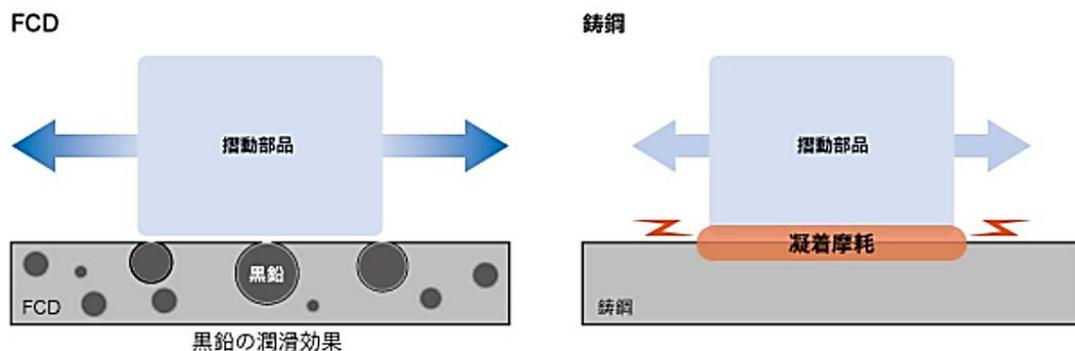


圖2-23 球墨鑄鐵與鑄鋼的磨損比較¹¹

此外，當鑄鐵含磷量超過0.7%以上時，基體組織可形成史帝田鐵 (Steadite)，為Fe-Fe₃C-Fe₃P 之三元共晶組織，此種金相組織更為堅硬耐磨，搭配著外露的石墨顆粒，常用於內燃機滑動構件。

2.3 管材內襯之演進及功能

2.3.1 古代供水管線材質

羅馬的管網：最早的公共給水系統源自於兩千年前的羅馬帝國，羅馬人透過大型渠道自遠方水源長距離輸送原水，採重力流動方式自動送達，渠道多以石材修砌而成，甚至以水道橋的工法跨河而過，許多水道系統屹立不搖保存迄今。當水進入城鎮之後，設置分水池(圖2-24)將水導入不同管線，此時已經無法以巨大的渠道配送至公共浴室、噴水池、公共廁所及豪宅，羅馬人便採用體積較小的石材管、陶管、鉛管、青銅管，其中又以鉛管最受歡迎，廣為採用。鉛的熔點低，稍微加熱就融成液態鉛，羅馬鉛匠迅速將熔鉛均勻倒於方型平台模具上，不一會兒凝固為方型薄鉛板，固態鉛十分柔軟並具有良好延展性，鉛匠便將鉛板捲成管狀，最後再以熔鉛封住疊合處，讓管身不會漏水，如此便完成一支鉛管。據考證，古羅馬的鉛管有25種尺寸，直徑由小到大約略介於23.1mm~228.3mm，每一種尺寸都有獨特的稱呼，但羅馬時期鉛管斷面並不是正圓形，而是略呈蛋形。因為自古羅馬以來鉛匠主要工作為製作鉛管，幾乎成為水管工人的代稱，影響所及，後來英文中的Plumber(水管工)、Plumbing(配管)，或是鉛的化學元素符號 Pb，都是源自於拉丁文對鉛的稱呼：Plumbum。

羅馬帝國由鉛匠鋪設了全世界第一個管網系統，由於鉛過於柔軟，太容易變形，因此給水管線系統的制水閥、止水栓、水龍頭等需要轉動或經常開關的設備，則以較為堅硬的青銅鑄造，以承受旋緊所產生的應力，透過上述複合型材料的使用(詳圖2-25)，古羅馬的城鎮給水系統也是最早供應龍頭水(Tap water)的管網。



圖2-24 法國尼姆(Nimes)的分水池遺跡(黃欽稜繪)

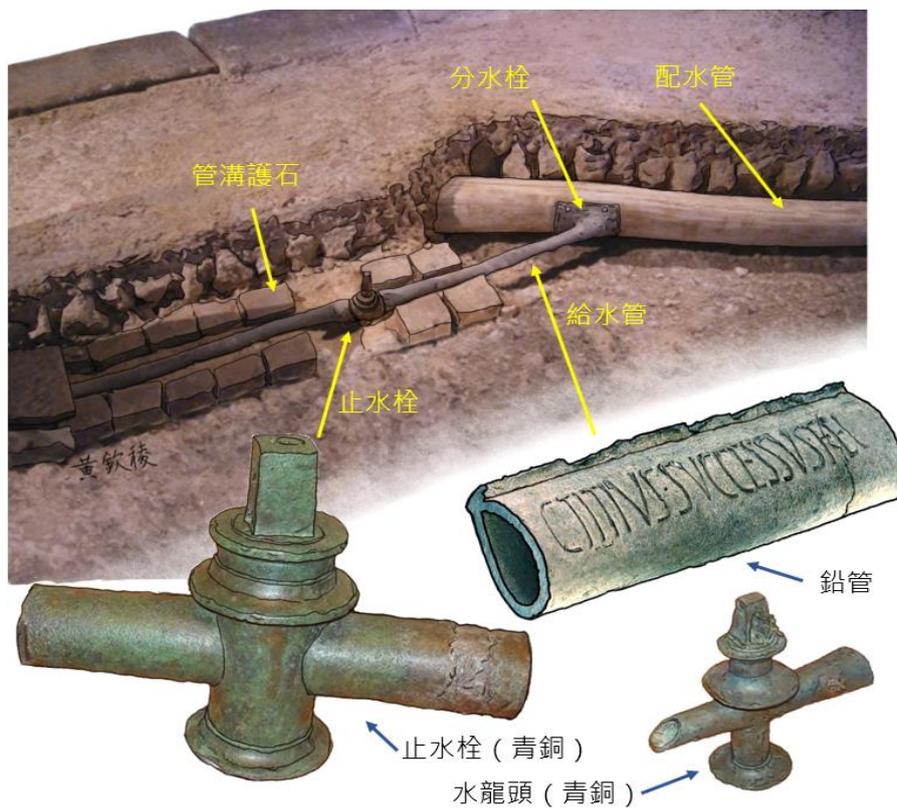


圖2-25 古羅馬供水管線之材質與管溝鋪設方式(黃欽稜繪)

羅馬帝國的城鎮供水管網曾經使用最大的鉛管口徑220mm約可比擬現代200mm鑄鐵管，由於鉛管化學活性很鈍，即便形成化合物也十分緻密，可避免進一步腐蝕金屬，因此不須額外塗佈內襯保護管壁，埋入地下開始

通水後，除非內部碳酸鈣堆積阻塞、由外部酸性物質侵蝕、或地震錯位鬆脫導致漏水，幾乎不需要汰換，以力學性質而言，鉛為小口徑管線之最佳材質，因此持續運用了兩千年，直到現在仍有小型給水管透過鉛管給水。

鉛的毒害：但科學家發現羅馬人的骨骸含有高量的鉛，由於二價鉛離子的結構和鈣、鋅離子相近，生活攝入的鉛，都會累積在骨頭裡。也有科學家分析了流經羅馬的台伯河於港口的歷史沉積物，顯示古羅馬都市排水中的鉛含量要比附近泉水高100倍。因此一些歷史學家認為鉛中毒困擾着羅馬人，從而加速了帝國的沒落。

不過科學家普遍認為中毒的原因不是使用鉛管，而是羅馬人喜愛用鉛容器盛裝及烹煮食物，甚至將鉛粉與葡萄汁熬煮成甜漿，作為佐料，熬煮中形成具甜味的但有毒的醋酸鉛(Lead acetate)，長期食用導致慢性鉛中毒。

二十世紀後半葉愈來愈多的研究均指出鉛離子對人體的不利影響，各國除了禁用含鉛汽油、各式塗料、添加劑之外，更紛紛訂定水中含鉛濃度的容許值，並要求水公司汰換鉛管，因此即便鉛管的耐腐蝕特性極優，但仍因具有毒性而漸漸退出管材主流。

2.3.2 近代管線與內襯保護的興起

1. 金屬管線腐蝕與其影響

使用歷史與腐蝕問題：為了滿足都市激增人口的用水成長，近代公共給水於19世紀開始由歐洲及北美等地萌芽。隨著管網供水學理的進展，群聚型管網也有整套設計興建的方式，由過去古代的低壓型明渠輸送，轉變為高位配水池重力輸送，不僅管線口徑放大，水壓也大幅提升，滿足了密集都會人口對於水量及水壓的需求，恰巧搭上工業革命後冶煉鋼鐵技術的研發，耐壓的金屬管紛紛發展出來。碳鋼系列中，含碳量最高的鑄鐵管最早被採用，事實上，早在文藝復興時期之前，歐洲便有私人建物或市政給

水採用最早的鑄鐵管，下列整理歐洲早期使用鑄鐵管的案例²⁶：

1412年：德國Augsburg被認為是最早使用的鑄鐵管線的都市。

1455年：德國Dillenburg 城堡首先使用鑄鐵管接取外部水源，詳圖2-26所示，以砂模澆鑄，凝固成型的鑄鐵管。

1680年：法國凡爾賽宮的花園首先使用法蘭銜接的鑄鐵管。

1700年：德國Kassel-Wilhelmshohe的一處噴泉採用鑄鐵管引水製造人工瀑布景觀，該址已於2013年獲得聯合國教科文組織(UNESCO)列為世界遺產。

1840年：德國Potsdam的Ruinenberg地區有一個Sanssouci公園，為了用水之需，設置了長達1.8公里的鑄鐵管，由遠方的Havel河透過水泵加壓送水，長途輸送到公園。



圖2-26 Dillenburg 城堡1455年所使用的鑄鐵管²⁶

但鐵的電位腐蝕問題一直困擾著供水行業，詳圖2-27，鑄鐵(Cast iron)的陽極腐蝕趨勢極高，雖然堅硬耐壓，但遠比兩千年前的羅馬鉛管更不耐久，鑄鐵管通水後往往不到數十年便開始鏽蝕，又以內部向外穿孔漏水、生物瘤阻塞斷面等問題較為嚴重。

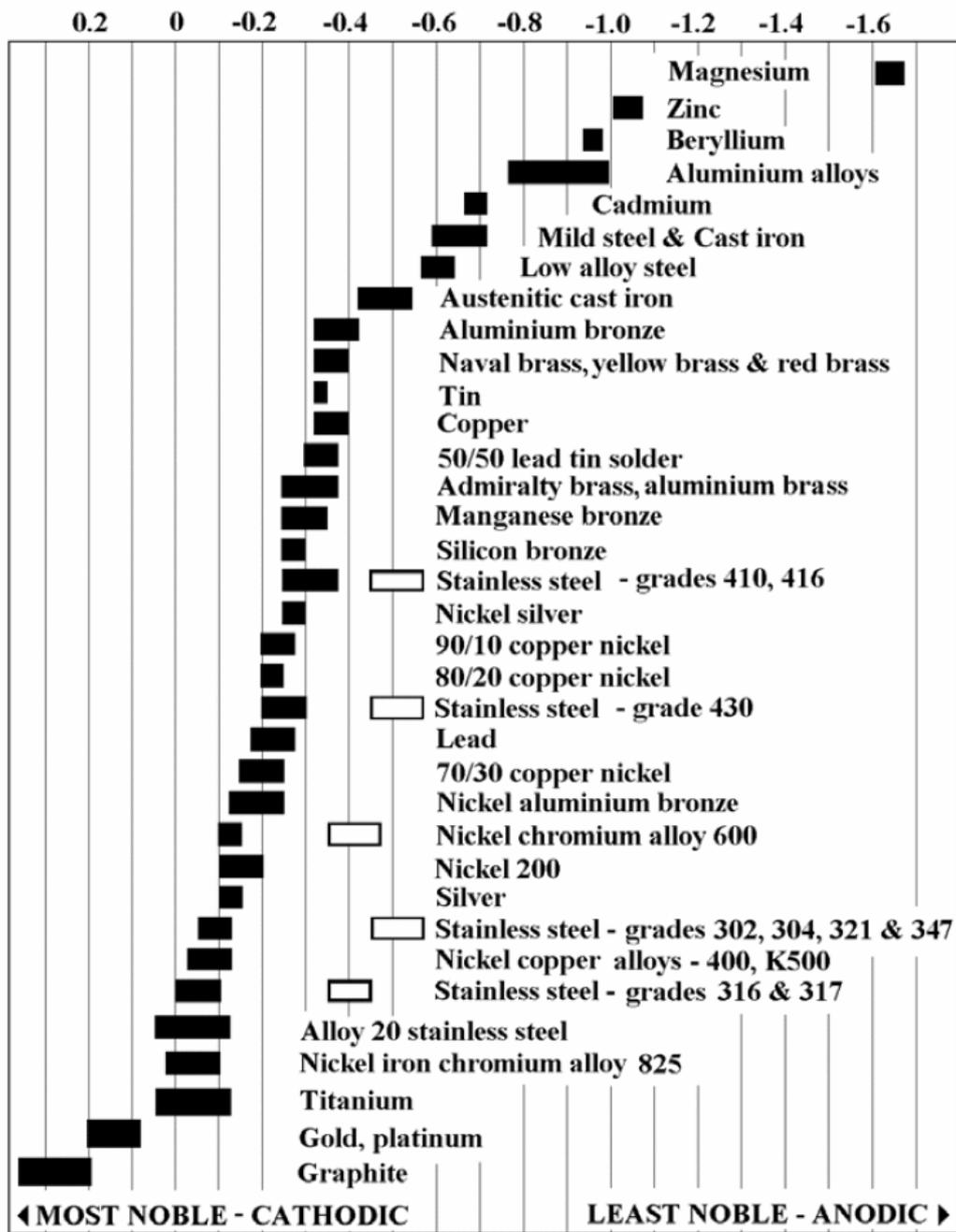


圖2-27 各種金屬的電位序列，愈往右側愈容易發生陽極腐蝕¹⁶

美國自來水協會(AWWA)估計，若欲解決鐵管內部腐蝕問題，唯有進行內襯改善或汰換新管，全美埋入地下的鐵管於未來20年內將會耗費水公司合計3250億美金，包含鑄鐵管(38%)、延性鑄鐵管(22%)、鋼管(5%)以及小口徑用戶鐵管¹⁷。其中又以鑄鐵管鏽蝕狀況最嚴重，因為其埋入時間最久。

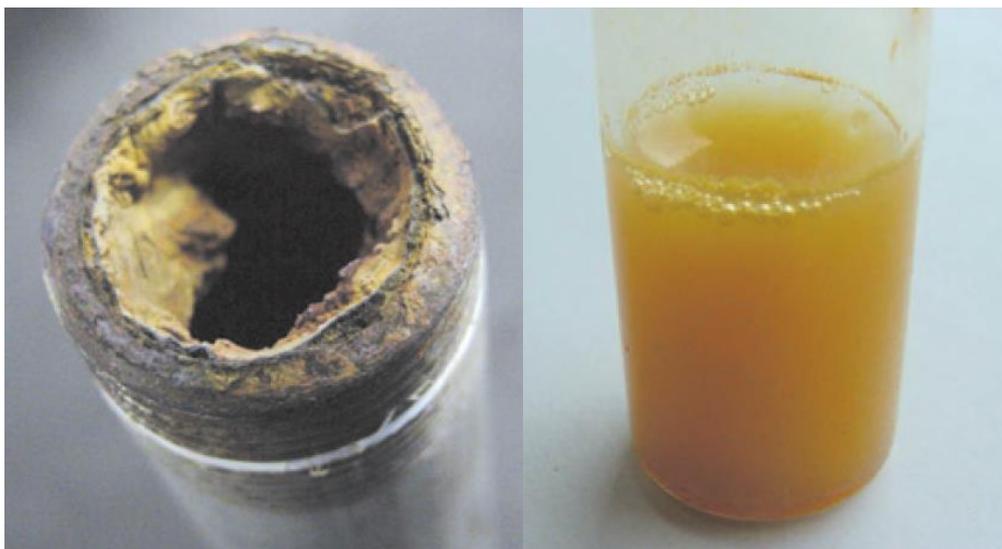


圖2-28 鑄鐵管內部鏽蝕(左)，以及「紅水」污染問題(右)¹⁷

水質問題：管線內部腐蝕更會造成輸送水質的劣化，如圖2-28，全世界採用鐵管的自來水事業機構，或多或少都曾遭到民眾投訴「紅水」的經驗，水質的改變為「色度」外觀不佳，或「臭度」口感不佳帶有鐵鏽味，雖未必全然有害健康，但民眾易對水質失去信心，而且紅水事件的爆發，有時與原水水質、加藥配比、氣溫、管網操作流速有關，不是經常發生的事件。雖然內壁腐蝕是無聲無息，但帶來的影響但卻是長期的，並不會表現在外觀與口感的改變，例如金屬管的重金屬離子的緩慢釋放，人體長期攝入累積下，有健康危害的疑慮，或者因管壁生物膜與鐵瘤遍佈，自來水餘氯可能在輸送之中就大量遭細菌消耗，抵達用戶蓄水池前可能就降到零，缺乏餘氯則有爆發水媒疾病的風險，例如2000年以後美國愈來愈多的退伍軍人症 (Legionnaires' disease) 就是一種水媒病，詳圖 2-29，為嗜肺軍團菌 (*Legionella pneumophila*) 在零餘氯的水池大量繁衍，導致抵抗力較差的人感染並引發肺炎。

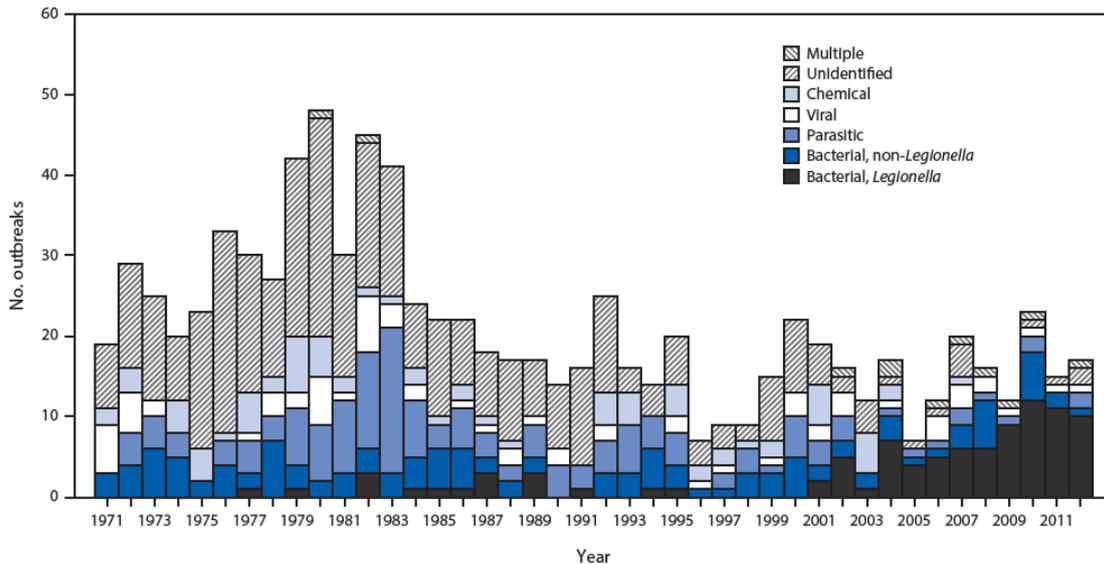


圖2-29 美國1971-2012年水媒病爆發數(851案)及種類(7類)¹⁸

生物侵蝕：鐵管系列的材質包含生鑄鐵、延性鑄鐵、中低碳鋼，本質上都是噬鐵細菌在缺氧狀態下的食物，該類細菌透過生物酶將鐵氧化後取得能量以繁衍茁壯，聚落一旦成形便鑽入管壁組織形成生物瘤或生長環，管瘤結構脆硬蓬鬆，不但讓管壁強度減損，更讓管線流通面積減少，如同在管網內部種下未爆彈，當管壁強度降低到某個程度後往往發生突發的爆管，而管瘤導致的面積減少更如同血管阻塞，增加管壁粗糙度，消耗水頭讓管網區域水壓日漸減少，甚至供不應求而發生尖峰抽水負壓污染事件，由管壁蔓延至閥栓的生物瘤，則會卡住機構讓操作者無法調整啟閉。

許多歐洲國家，例如瑞士、奧地利、德國、荷蘭、丹麥某些管網系統已經不再使用無內襯的純鑄鐵管，管網內也幾乎不存在容易藏污納垢、滋生細菌的老舊鑄鐵管，再加上這些國家的原水品質清澈無污染，淨水場大多經過簡單的沉澱過濾，少數使用紫外線、臭氧殺菌，就送入管網，不加氯輸送，因為管網、水質都很穩定，整體「生物穩定性」極為優良，上述某些國家的水質標準甚至規定不能有任何餘氯，以避免產生致癌的消毒副產物如三鹵甲烷、鹵乙酸等物質。這些歐洲國家除了將鑄鐵管更換為石化管材，另外的方法就是以內襯保護鑄鐵管，避免水中生物的侵蝕與群聚。

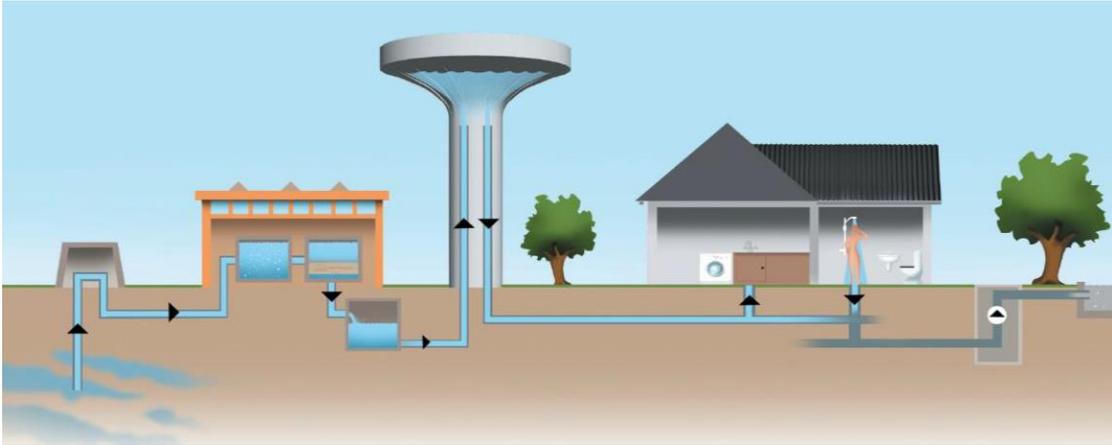


圖2-30 丹麥原水為地下水，淨水場只進行過濾，不得加氯消毒¹⁹

2.使用水泥內襯(Cement Mortar Lining)與帶來的影響

水泥內襯管歷史：使用無內襯鑄鐵管的自來水公司，後來幾乎都面臨管線腐蝕及水質劣化的問題，輸送某些特殊的水質，其管壁劣化的程度與速度更是超乎想像。大約在1860年代，法國科學學院(French Academy of Sciences)首先建議水公司以水泥內襯作為各類型鐵管的保護，以降低裸管的侵蝕問題。美國1870年代開始於新英格蘭(New England)、中大西洋各州(Middle Atlantic States)採用薄殼鍛鐵(Wrought-iron)內襯水泥的配水管，鍛鐵管殼相當薄，內部則以相對厚重的水泥保護，厚度約半英寸以上，但使用後發現壽命僅約25~30年，大多因水泥崩解，薄鍛鐵殼層很快就穿孔損壞。為了增加使用壽命，也有在外層再加上水泥保護，例如在麻薩諸塞州曾經有10英寸(250mm)的配水管採用內外混凝土的保護。真正的第一支水泥內襯鑄鐵管，則至1922年才於南卡羅來納州的查爾斯頓(Charleston)埋設，為厚實鑄鐵管身搭配相對較薄的水泥內襯，當時使用混凝土噴塗法於工廠製造，但後來很快研發出旋轉離心的方式，將水泥砂漿更均勻塗佈於內壁，並採用更好的水泥養護技術，內襯緻密平滑，大幅降低水泥內襯管的摩擦阻力，新管海森威廉斯C值高達150以上，大受水公司的歡迎，水泥內襯鑄鐵工業於是興起。為了標準化，AWWA在1930年代訂定了水泥內襯鑄鐵管標準，

ASTM也於1950年代訂定了內襯專用水泥標準：採用波特蘭水泥，雖然隨後還有更多標準調整與規範修訂陸續推出，但大體上水泥內襯鑄鐵管已於1960年代定型，並陸續向全世界輸出技術。

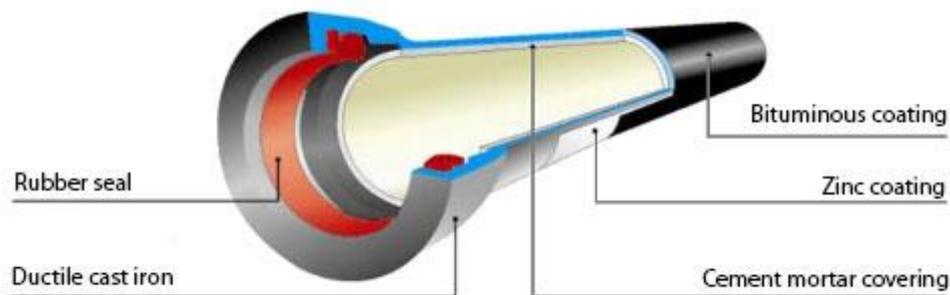


圖2-31 現代水泥內襯延性鑄鐵管構造圖示²⁰

加了水泥內襯的鑄鐵管，不但具有鑄鐵管的耐壓強度，而且多了保護層足以抵擋生物侵蝕與化學鏽蝕，而且材料與生產標準化，品質大幅提升，經過一系列放流實測，埋入現場1~39年的管線，C值也高達125~151之間，因此至1970年代，全美大約八成的配水管均採用內襯鑄鐵管²¹。學者分析也發現，在輸送同樣的水質下，鑄鐵裸管與內襯鑄鐵管兩者的微生物繁衍狀況大不相同，純鑄鐵管的微生物聚落龐大且欣欣向榮，大量增長形成明顯生物瘤狀物，但微生物種類多樣性較少，相較之下，水泥內襯管的微生物聚落十分稀疏，僅僅為層狀沾附生長，肉眼看得出黑褐的一層薄膜，俗稱生物膜，但具有較高的生物多樣性¹⁸。

水質問題：雖然水泥為鹼性物質，對金屬管有著優勢的鹼性保護作用，避免酸性化學腐蝕，而且使用水泥內襯覆蓋鑄鐵裸管，可有效隔離嗜鐵菌生長，避免生物性侵蝕所引起的水質劣化，然而，水泥本身就會釋放化學物質，即使水泥砂漿初凝後再經過良好的養護，讓水合結晶凝膠物(水化矽酸鈣，C-S-H膠體)充分生長發育，完整形成水泥強度，但水泥微觀結構為多孔材料，除了具有強度的水合物結構之外，孔隙部位都填充了可溶解的鹼性化學物質，透過毛細現象吸入外部水分，看似堅硬的水泥仍會溶出物

質釋放到自來水中，過程中會增加水中鈣離子、pH、鹼度，以及其他金屬，對水質的影響可能長達4年²²。水泥硬化後析出(Leaching)的現象十分常見，在一般混凝土構造物長出的「白華」、「壁癌」，就是水泥內部物質溶出並且沉積在表層所致。



圖2-32 水泥析出物質堆積在外產生的白華²³

如果在流動性較高的管段，因為稀釋作用，上述的溶出物質濃度不會攀升，維持在合格範圍內，但是在低流動的管網末端區域，往往濃度飆升，導致用戶投訴水質滑膩、皮膚搔癢等症狀。各國水公司面臨這類水質問題，即便採用不同種類的水泥，如波特蘭I型、II型、高爐水泥、飛灰水泥，水質雖稍有差異，內襯「吐鹼」的狀況仍無法有效改善，尤其是水質偏軟(Soft water)的供水區域，水的鹼度(Alkalinity)低，對氫離子吸收的緩衝能力小，總溶解固體(TDS)、鈣離子濃度低，自來水的對內襯的溶出能力大幅增加，形成侵蝕性(Aggressive)自來水，不斷帶走內襯的離子，稍有滯留，各項離子濃度便接近飽和狀態，pH甚至超過9以上，超過飲用水標準甚多。即便在流動狀態下，濃度的升高也難以避免，管徑愈小，單位長度管線的(內襯面積/水體體積)比例較大，濃度增長的速度就愈快，除非流量夠大，管中置換

水體的速度大於析出速度，離子濃度才會穩定不致增長。

因此使用水泥內襯的供水行業，有時候必須對淨水場出水水質進行化學成分的調整，尤其是使用海水淡化的水，幾乎是純水，除了混合其他水源的方法之外，甚至還要人工添加碳酸氫鈣、碳酸鈣、氧化鈣...等，增加水中離子，在符合飲用水水質條件下，拉高自來水鹼度，以降低自來水對水泥內襯的侵蝕性。

此外，水泥中的其他成分也會在管壁泡水後逐漸溶出至水中，比較受到關注的是鋁離子。水泥粉的主要成分包含鋁酸三鈣(C3A，為 $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 的簡寫)、鋁鐵酸四鈣(C4AF)、矽酸三鈣(C3S)、矽酸二鈣(C2S)，其中第三項物質為水泥主要強度來源，形成水泥C-S-H膠狀物的主要成分，而前兩者含鋁，水泥粉加水攪拌後便開始水化產生鋁離子，尤其是鋁酸三鈣的水化反應最為迅速，加水數分鐘內即產生反應。各種水泥的含鋁比例，詳表2-2所示，最常用作鑄鐵管內襯的波特蘭水泥也有5%的鋁含量，但水泥製造的成分很難精確控制摻料成分，因此鋁含量可能是變動的。

鋁離子被認為長期攝入後可能會影響腦神經，甚至導致阿茲海默症，而自來水內襯突然溶出的高劑量的鋁離子則對會對洗腎病人有致命的危害，當血液透析過程誤用高鋁離子的自來水，會使病人急性鋁中毒，輕則嘔吐、抽筋、腹瀉，重則死亡。

自來水公司使用水泥內襯陸續浮現上述的水質問題，因此大約自1970年代，製造商開始在水泥內襯加一層塗膜，例如瀝青(Bituminous coating)、環氧樹脂(Epoxy)、聚氨脂(Polyurethane)。

表2-2 各種主要水泥鋁含量比例，以及某研究所測得之比例²⁴

Aluminum Composition of Common Cement Linings (% as Al ₂ O ₃)				
Blast Furnace Cement	Pozzolanic Metallurgical Cement	High-Alumina Cement	Portland Cement	Berend and Trouwborst Study Cement
13%	13%	36%	5%	18.7%

3.水泥加密封塗層內襯(Seal Coated Cement Mortar Lining)

瀝青產品塗層(Bituminous coating)：早在水泥內襯發明前，製造商已經想到將熱柏油澆置於鑄鐵管內外壁，以形成保護層(詳圖2-33, B.C.D小圖, A圖無內襯)，這種方法不但便宜而且保護效果好，當時熱柏油、煤焦油等(統稱瀝青產品)廣泛應用於水池內壁防漏、屋頂防雨，在各種想止漏堵水與保護的場合，都會發現瀝青產品的蹤跡，但後來學者發現會釋放可能致癌的多環芳香烴(PAHs)，實驗顯示老鼠懷孕期間餵食大量的PAHs會導致本身及後代的不孕，很高的機率在出生時產生缺陷或是體重不足。

荷蘭學者想了解PAHs釋出情況，對於該國曾經塗過瀝青產品的鑄鐵管，收集在不同狀態下，如洗管、維修、平常流況之自來水樣本，詳如圖2-34，檢驗後發現經過大流量洗管的自來水管，其PAHs濃度最高，不過很快就回復正常，維修管線也會擾動瀝青內襯，進而釋放PAHs，濃度次之，但皆已超過飲用水標準了，而且連續超標近40日，至於平常狀態未擾動內襯的水樣，幾乎測不到PAHs。

雖然荷蘭的研究認為塗了柏油的管網，大體上對人體健康危害的風險不高²⁵。但美國衛生及公共服務部(DHHS)已經將瀝青釋放出的一些PAHs視為致癌物質，食用會造成肺癌、覆著於皮膚上會造成皮膚癌，因此後來製造商大多只敢將瀝青產品塗在水管外壁，基本上目前水泥內襯加上的塗層，已經找不到瀝青衍生的相關產品，算是已經被淘汰的技術，臺灣鑄鐵管外壁仍使用。



圖2-33 不同厚度煤焦油塗佈鑄鐵管的損壞比較(D最厚)²⁵

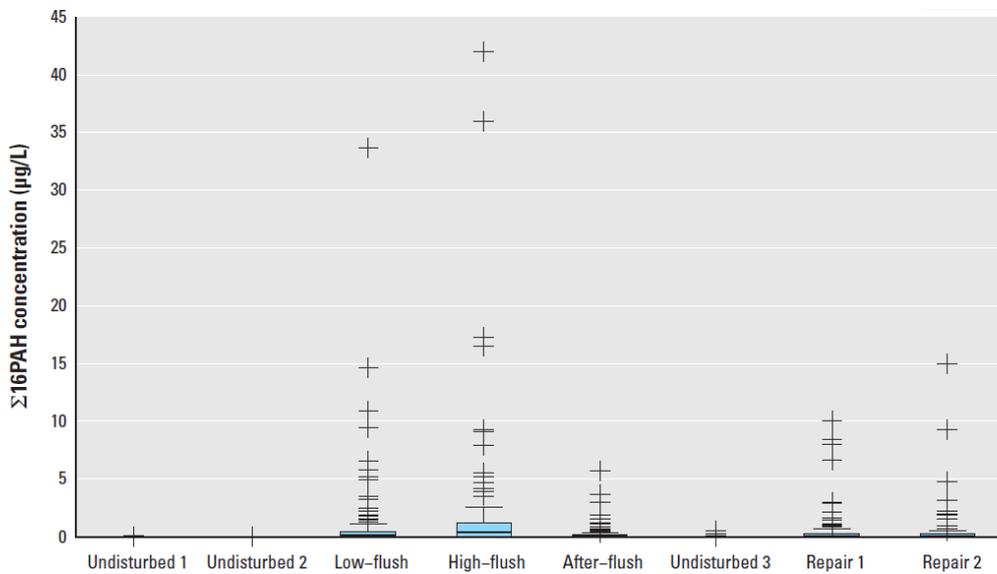


圖2-34 荷蘭柏油塗佈內襯鑄鐵管，不同擾動後PAH釋出量²⁵

環氧樹脂塗層 (Epoxy resin sealed): 1970年代水泥內襯大量在全球使用後，開始有許多內襯「吐鹼」影響水質案件傳出，為了改善此一現象，除了以柏油塗佈之外，也在此刻某些廠商以液態環氧樹脂密封水泥內層，詳

圖2-35，管線最外層採用柏油瀝青保護，內層則先以水泥砂漿離心貼附鑄鐵管壁，硬化後，再以液態環氧樹脂塗佈，同時混合硬化劑讓化學反應進行，最後硬化形成均勻貼附的最內層，這層環氧樹脂除了能夠隔離水泥鹼性物質釋放到水中，還有保濕效果，讓水泥硬化後的漫長養護過程水分不致逸散，可增加水泥內襯強度。



圖2-35 於水泥表層塗佈加密封塗層之水泥內襯鑄鐵管²³

英國的自來水界比較早運用此技術，甚至取代掉水泥砂漿內襯及柏油塗層，只使用環氧樹脂做保護。並且研發許多老舊管線現地更生(CIPP)的技術。由於環氧樹脂與硬化劑等都是化學藥劑，若作為水管內襯輸送飲用水，必須有相對應的規範，美國自來水協會研究基金會(AwwaRF)便提出現地內襯更生施作的規範建議，材料必須是無溶劑、不含苯甲醇等兩項化性要求，此外還規定施工性，如抗坍塌、快速硬化、耐濕氣，並分為兩類環氧樹脂：Type 1 & 2。Type 1的流動性好、黏度低，可利用泵浦加壓噴塗施工，Type 2是比較後期推出的產品，雖然主要的環氧樹脂成分相同，但黏度較高，需要以特殊的施工機具噴塗施作，使用的硬化劑不同，養護的方式也稍有差異。根據一項1997年的統計，全英國自1982至1988年，一共約247公里的自

來水管塗佈了環氧樹脂²⁸。許多都採用單層環氧樹脂，以現地更生方式黏附於原本的裸鐵管、水泥內襯管，如圖2-36所示。



圖2-36 僅塗布環氧樹脂的鑄鐵管¹⁸

對水質的影響：如同剛開始大量使用水泥內襯鑄鐵管的年代，民眾對鹼性水質的抱怨立刻增加，國外開始使用環氧樹脂內襯塗佈管線也不例外，民眾抱怨水質異常通常是化學氣味，比起鑄鐵裸管的紅水、水泥內襯的滑膩水等抱怨少了許多，但氣味的來源成分卻十分複雜，代表內襯可能滲出多種有機化學物質，詳表2-3，民眾舉報的味道以紅色字體顯示，例如水嚐起來似乎聞到醛香味(Aldehyde)、酚芳味(Phenol-like)、甜味(Sweet)、甜溶劑味(Sweet solvent)，可能是環氧樹脂滲出苯甲醛(Benzaldehyde)、雙酚A(Bisphenol-A)、苯酚(Phenol)、苯乙烯(Styrene)、甲苯(Toluene)。這些投訴通常發生在現地更生舊有管線，塗佈使用大量藥劑，如果配比稍有差池、硬化養護沒控制好，就會發生。

表2-3 環氧樹脂溶出的25種化學物質對應民眾舉報異味²⁹

1,1 – dichloroethene	ethyl benzene
3-methoxy-2-propanol	Ethylhexanol
4,4-methylenedianiline	isobutyl acetate
Benzaldehyde – “aldehyde”	isopropoxy propanol
Benzidine	methylisobutyl ketone
benzyl alcohol	n-butanol
bisphenol-A – “phenol-like”	n-butyl acetate
bisphenol-A diglycidal ester	Nonylphenol
bisphenol-F	Phenol – “phenol-like”
Butoxyethanol	Styrene – “sweet”
Diethylenetriamine	Toluene – “sweet solvent”
diphenyl ether	tripropylene glycol
Epichlorohydrin	

民眾的舉報或許不夠精確，但透過聞臭師組成小組檢視臭度，發現與民眾差異不大，通水後24小時內的水樣所有成員都認為有中等強度，描述包含甜味、藥品味、燒灼味...等，隔天強度大幅下降，但持續一個月之後，成員仍有人嗅出淡淡味道。

對於整體管網而言，這些環氧樹脂如同植入了緩慢釋放了化學成分的物品，將會對原有化學平衡帶來擾動。國外的研究指出，內襯釋放化學物質將導致總有機碳(TOC)、半揮發有機物(SVOCs)會增加數倍至數十倍，將會消耗水中消毒劑如氯(Chlorine)、氯胺(Chloramine)，其中又以氯消耗的速度比氯胺更快。國外也做了對照實驗，比起其他種類的管材或內襯(裸鑄鐵、PVC、瀝青...)，環氧樹脂消耗速度最快。尤其前24小時的接觸，耗損的消毒劑最多，超過90%的餘氯、13%的氯胺都在第一天被耗盡。

雙酚A為環氧樹脂的製造原料之一，為關鍵單體，環氧樹脂成品雖然為鏈狀結構，某些情況下仍會斷裂釋出雙酚A，詳圖2-37，

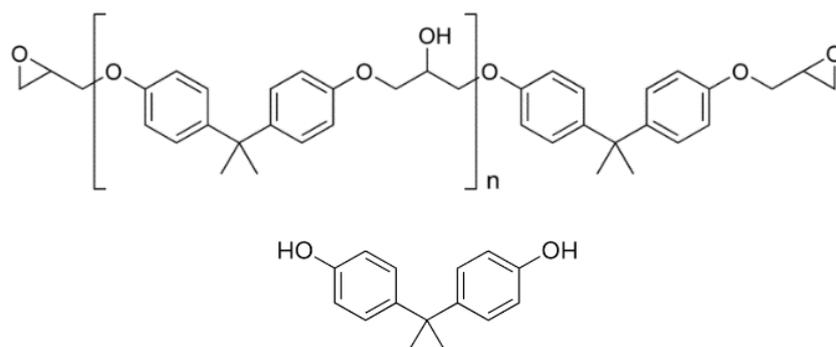


圖2-37 環氧樹脂(上)鏈狀結構斷裂將析出雙酚A(下)³⁰

雙酚A溶出的多寡，可間接量測化學需氧量COD值，兩者呈現正相關²⁹。雙酚A(簡稱BPA)的化學結構類似雌激素，過去多項動物實驗發現高劑量BPA與不孕、肥胖、癌症、流產、內分泌失調有關，已經被多國認定為環境荷爾蒙，在臺灣的環保署也列為第四類毒性化學物質，NSF-61規定的水中容許濃度為0.1mg/L，歐盟的每日耐受量(Tolerable Daily Intake, TDI)為0.004mg/kg b.w./day³¹，所幸環氧樹脂釋出BPA的濃度不是很高，研究指出水溫愈高愈容易釋出，但幾乎都在規範容許值內²⁹，仍有其他低量的揮發性有機物VOCs、苯污染物BTEX，會於現場舊管更生完成後，或安裝新的管線之後，濃度提升。國外學者將塗過兩次環氧樹脂(各風乾24小時)的試片浸泡在滯留水中，連續72小時之後，化驗水中的BTEX及總有機碳TOC，詳表2-4，發現濃度變異很大，但大部分濃度累積到很高的程度，代表使用環氧樹脂於末端管線時，因為滯留水將會累積超高濃度的化學物質，民眾可能抱怨水中有很重的溶劑味。

表2-4 環氧樹脂試片浸泡72小時的BTEX、TOC溶出濃度²⁴

72-Hour Epoxy Resin Leaching Results		
Coating	BTEX (mg/L)	TOC (mg/L)
Epoxy 1	13.2	166
Epoxy 2	4.9	34
Epoxy 3	48.0	279
Epoxy 4	0.2	345
Epoxy 5	25.6	143

2.3.3 熱固型管材塗層介紹

粉體塗裝(Fusion-bonded epoxy coating, FBE coating)的興起：臺灣「粉體塗裝」一詞源自日文的「エポキシ樹脂粉体塗装」，為日本工業界翻譯自Epoxy-resin powder coating 而來，雖有譯出材料為粉末的字眼，但卻沒有完整表達高溫熱熔的製程，無法望文生義由字面上得知屬於「熱固型」塗裝，不過已約定成俗。粉體塗裝科技自1960年代研發後，與傳統液態常溫「噴漆」塗裝、揮發溶劑加溫「烤漆」塗裝等技術相互競爭，粉體塗裝的市佔率不斷成長，其優點很多，包含不需使用揮發性有機溶劑，不會造成溶劑中毒，也沒有滲出污染管中自來水的問題；噴塗技術比較簡單，採用靜電吸附，均勻塗佈，甚至可全自動化塗裝，相較液態塗裝有流漆、滴漏、表面厚度不均勻等問題，粉體塗裝過程即便需要人力輔助，也不需特殊訓練的漆匠。

粉體塗裝為熱固型聚合物(Thermoset polymer)，其粉末成分為環氧樹脂、硬化劑、填充物、色劑，主要成分為前兩項，不同的硬化劑配方將決定熱熔後的樹脂鏈結發展程度，形成不同硬度、延展度的FBE內襯。熱熔溫度則依照粉末供應商的說明書，一般要加熱到150~220度，以讓粉末充分融化，滲透至管壁毛細孔，生成鍵結。環氧樹脂粉末主要由雙酚A合成，與液態環氧樹脂的原料相同，差別僅在硬化劑的不同，某些液態環氧樹脂尚需搭配溶劑才能在常溫下混和硬化劑，充分聚合硬化，粉體塗裝則需高溫熱熔才能將所有粉末液態化混和，經過50多年的研發，市面上也有雙酚F、Novolac、Aliphatic...等單體合成的環氧樹脂產品。粉體管線的生產流程詳圖2-38，在靜電吸附粉末前，還要處理表面，去除生鏽、油漬，甚至以高壓空氣帶著細砂噴管壁表面，產生細微粗糙面，讓融化的樹脂穩固咬合管壁。

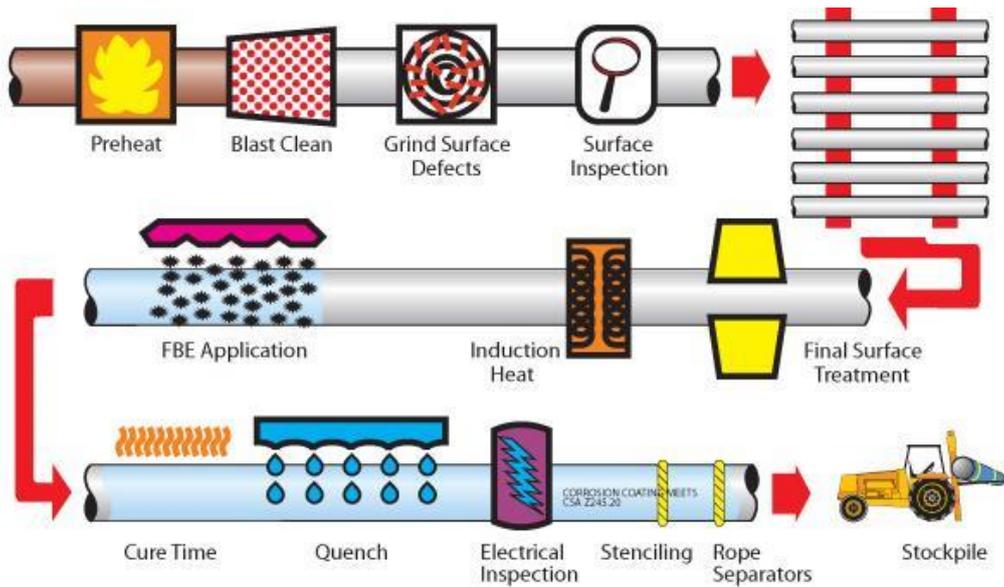


圖2-38 管線粉體塗裝的製造流程³²

由於高溫熱融的特性，粉體塗裝適合用於金屬構件，尤其是不怕加熱損壞的鑄鐵材料，經過製造商的運用及改良，臺灣的鑄鐵管管件內襯、制水閥、消防栓、中小型表箱、伸縮接頭...，均已使用粉體塗裝，但直管仍舊使用較傳統的水泥內襯。由於全自動化粉體塗裝機器的引進，粉體塗裝直管的價格也日漸降低，品質大幅提升，日本NS耐震接頭直管就採用粉體塗裝，幾乎日本中小尺寸的延性鑄鐵管，由直管、管件到配件清一色都採用粉體塗裝，並且訂定JWWA規範確保全國水道局品質一致。

粉體塗裝技術自1970年以後異軍突起，國外金屬管線抗蝕及防腐的內襯及外披覆，幾乎每家大型鑄鐵管製造商都有粉體生產線，如圖2-39，為中國大陸某鋼管製造商產品，由最廉價的瀝青塗層、水泥內襯、液態環氧樹脂，到最新的多層粉體塗裝一應俱全。

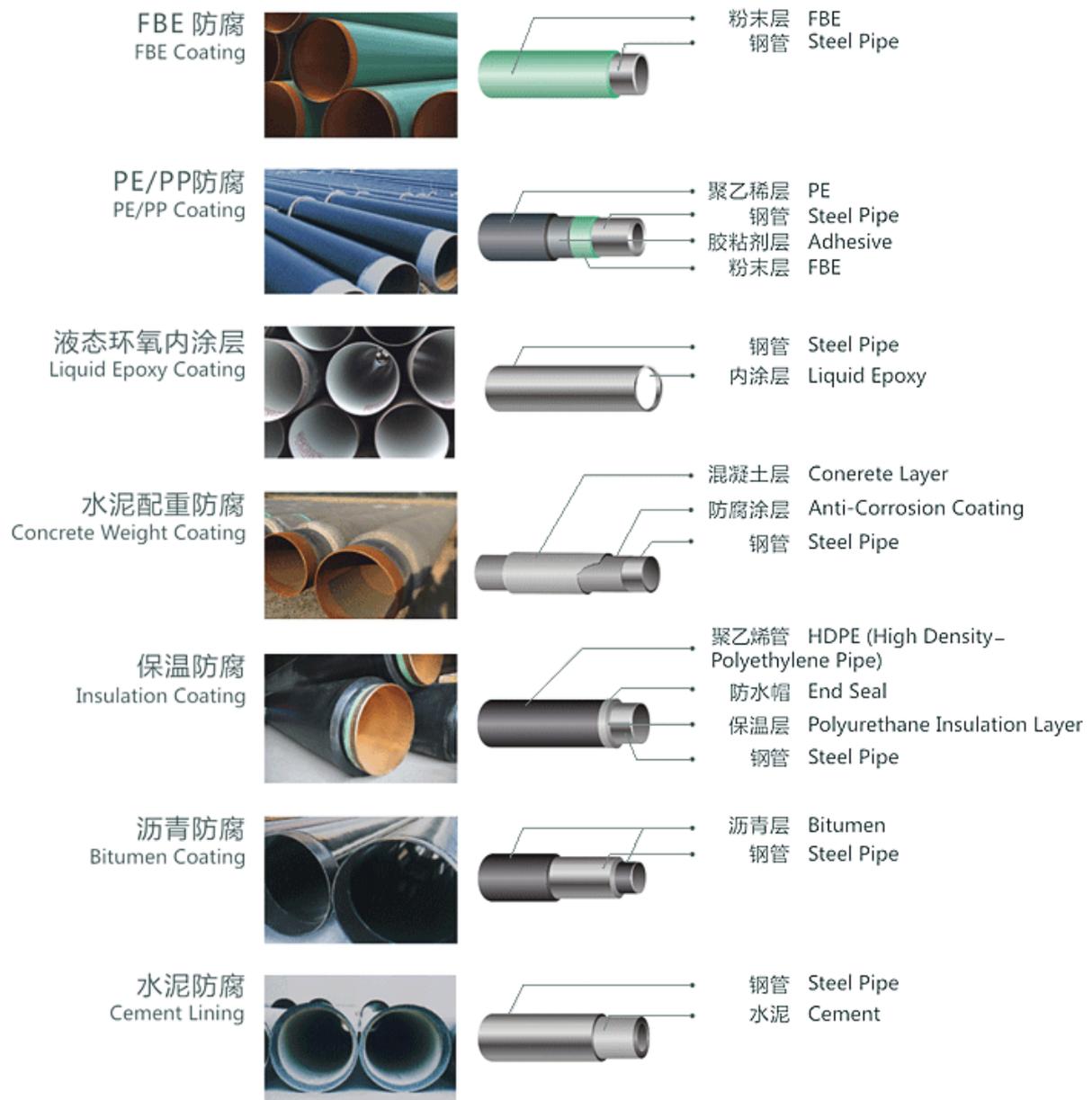


圖2-39 中國大陸珠三角的某鋼管製造公司各系列塗裝產品³³

塗層剝離：相較於厚實的水泥內襯，管線施以粉體塗裝後雖然流通斷面較大，但因為塗層很薄，以材料力學的觀點來看，並不具有抗剪力，而且延展性也不如瀝青系列，如果粉體塗裝喪失附著力，將發生塗層剝落的問題，直接暴露出鑄鐵面，反而比水泥內襯的保護防蝕更差，而且碎片阻塞用戶水表的問題時有所聞。

粉體塗層剝落機制(Disbondment)為物理性及化學性雙重影響，雖然粉體看來光滑緻密，但高分子鏈結中間仍有縫隙，可讓水分子通過。當塗層

浸水之後將開始吸收水分，水分子穿透粉體的深度很緩慢，遵循Fick's Law 物理擴散公式，抵達鑄鐵面層之後便開始發生鑄鐵與水中離子的化學反應，鐵首先被氧化，析出電子，然後電子再與水分子反應生成氫氧根，形成鹼性的環境，隨著粉體與鑄鐵縫隙間的pH升高，塗層開始起泡(Blistering)，若起泡內部的鹼性水愈積愈多，隆起面積不斷擴大，塗層的張力超過斷裂強度，鄰近塗層再也拉不住，就發生脫層(Delamination)，詳圖2-40下圖，電子透過鑄鐵傳遞，下一個起泡點可能落在遠方。若水中含有氯離子、硫酸根，或水溫較高，則上述化學反應將加速，內襯起泡發生的更快、更多，圖2-40右上圖剝落的底層有許多圓形的鐵鏽痕跡，就是起泡蓄積鹼性水的位置。此外，如果製造商塗佈粉體前並未確實去污，以及配比、熱熔控制不當產生微氣泡瑕疵(圖2-41左圖)，將使得水分子入滲更快，表層污染處也提早發生上述化學反應，加速起泡，再加上污染面的塗層黏著力低，多重影響下，整片塗層剝落狀況將提早發生。如果運搬管材、埋管施工不慎刮傷塗層，結果也是讓剝落提早發生。

至於粉體塗裝的滲透性，中國工程師設計了加速滲透研究，以高濃度1.5mol/L的鹽水，升溫至60度，浸泡兩組不同的粉體塗裝試片，定時取出量測試片正面(塗層)與背面金屬間的電阻，發現一開始水分未滲透，隔著不導電的塗層，電阻很大，但隨著塗層吸水，電阻一下子就掉下來，兩個塗層大約在50~80天的浸泡之後，電阻值才穩定，代表水分已經穿透整個塗層，詳圖2-41右圖，其中雙酚A環氧樹脂，吸水滲透性比較強，電阻掉得比較快，另一個是醛酚環氧樹脂，吸水滲透性就比較弱，因此塗裝滲透性與材質也有很大的關聯性³⁶，但上述採用極端的高溫濃鹽水，才會加速滲透，輸送普通的自來水，滲透速度並不會這麼快。

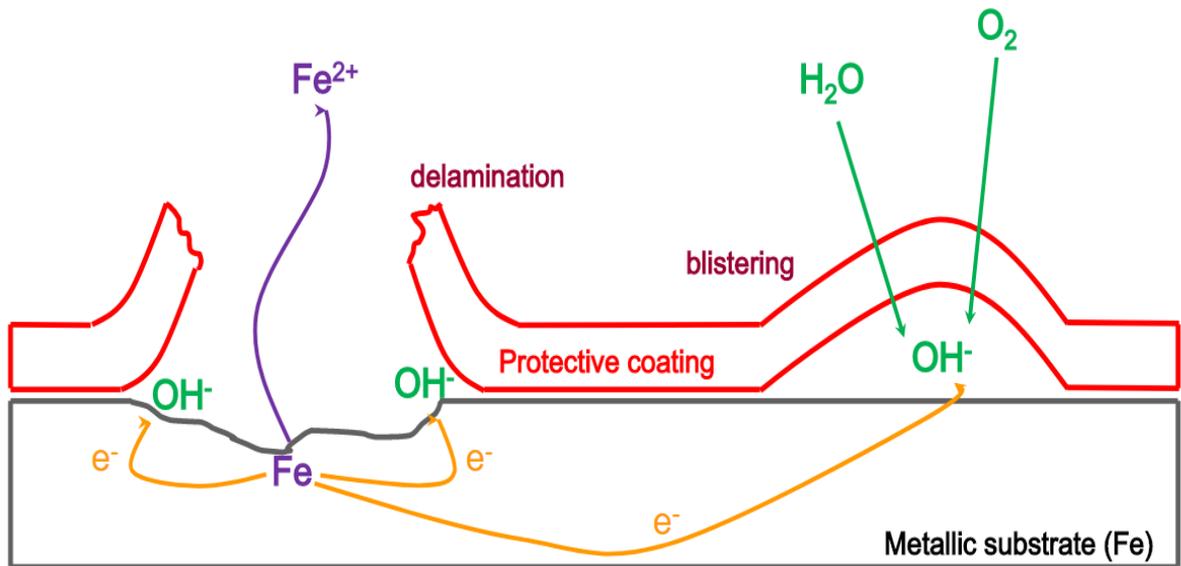


圖2-40 粉體塗裝剝落(上)及剝落的機制圖示(下)^{34, 35}

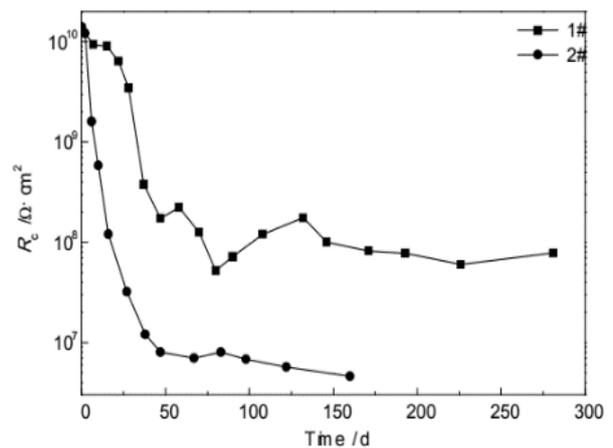
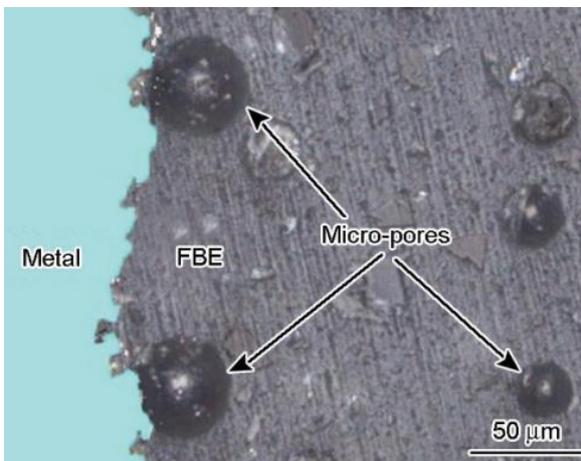


圖2-41 塗層內部孔隙(左)，不同塗層的吸水電阻試驗曲線³⁶

塗層防脫自我維持機制(Fail Safe)：國外研究塗層起泡的內部化學成分，發現泡泡(Blister)中的水分pH高達11以上³⁴，證實塗層與鑄鐵間隙中生成的氫氧根，均被困在泡泡內而且不斷累積濃度，但鑄鐵怕酸不怕鹼，在鹼性的環境中反而不易腐蝕，就如同水泥內襯提供鑄鐵管的鹼性保護一樣。如果塗層沒有破口(Holiday)孔隙，鑄鐵不直接接觸管中水，而是被塗層夾帶著些許鹼性水包覆住，則鑄鐵管不但不會腐蝕，而且可以維持鑄鐵的新鮮，形成塗層防脫的自我維持機制。這也是為何國外許多粉體塗層鑄鐵管使用了20~30年仍然狀況良好，即便塗層已經完全吸水飽和，水分滲透到鑄鐵面了，也有起泡發生，但因為上述的化學機制的保護，鐵管完全不發生鏽蝕。但如果泡泡內的pH只維持在8~10之間，鹼性不夠，則鑄鐵仍會漸漸生鏽，最後脹破塗層，時間久了以後還是發生剝離。至於泡泡中pH的濃度則取決於管中各項離子濃度、酸鹼度、溶氧量的平衡，所以塗層的透水、透氣性、甚至塗層厚度也會有所影響，文獻³⁷認為目前常用的0.3~0.4mm厚度最適合發展出自我保護機制，讓pH介於9~13之間，如果刻意加厚粉體的塗膜反而不利，例如現場以液態環氧樹脂塗佈更生的水管，雖然與粉體塗裝都是環氧樹脂，但採用的硬化劑不同，生成的分子連結方式不同，滲透性有差異，厚度也比較厚，就難以產生自我保護機制。甚至也不要刻意刮除起泡部位，以熱縮套(Heat Shrink Sleeve)包覆後火烤束緊修補，如圖2-42，右圖修復後因為完全屏蔽電流進入，熱縮套內部也沒辦法生成鹼性環境，反而會導致包覆內的鑄鐵氧化生鏽。

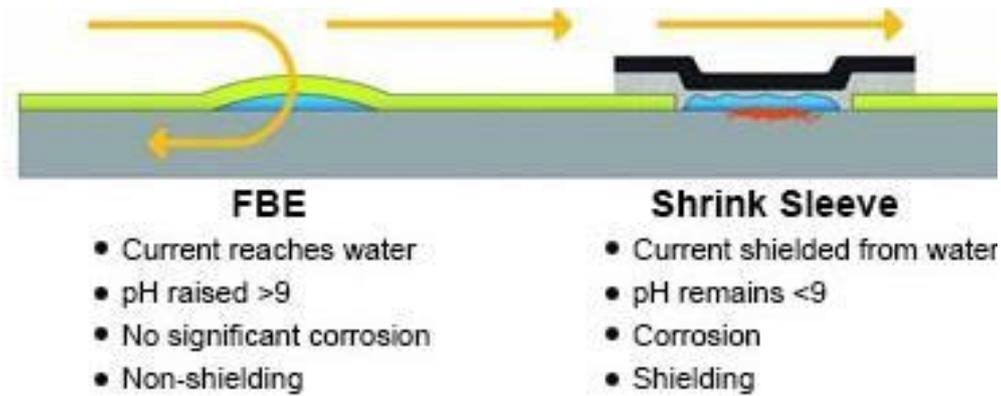


圖2-42 粉體塗裝可讓電子流入，達成陰極保護避免腐蝕³⁸

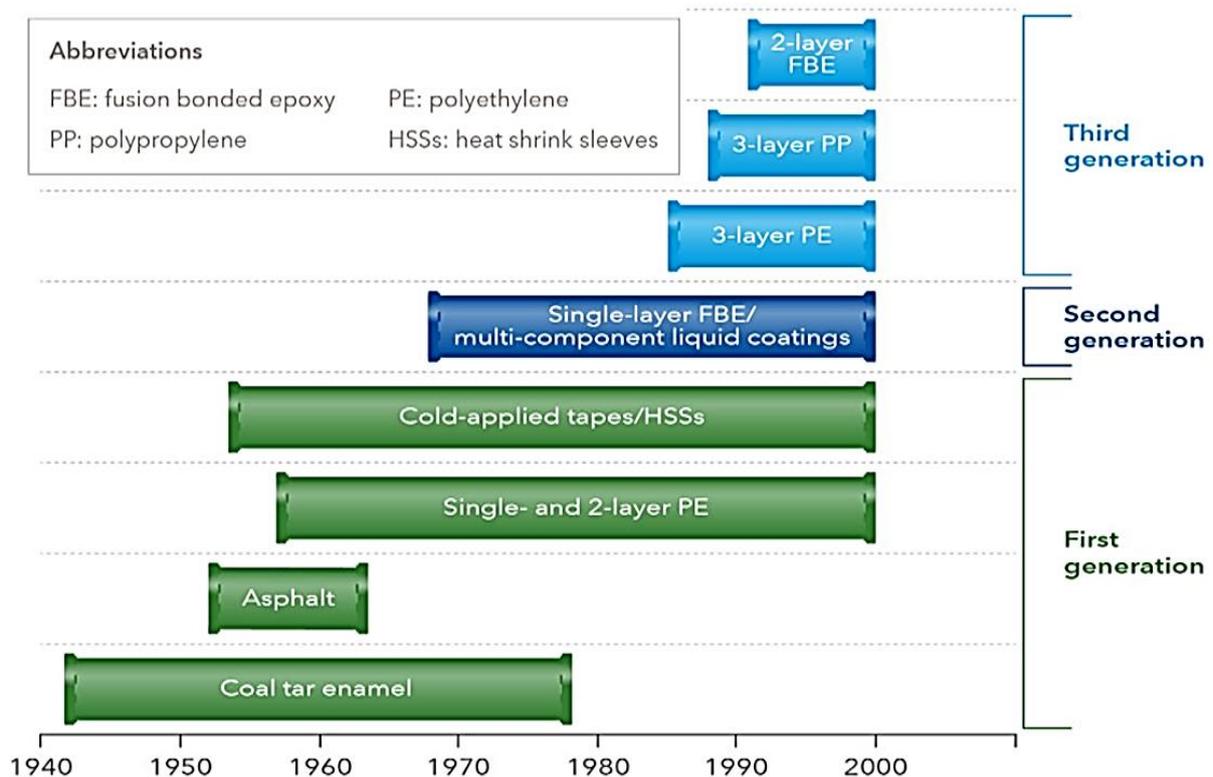


圖2-43 各類有機質塗層技術的演進³⁹

粉體塗裝的優勢：雖然粉體塗裝有剝離的問題，而且厚度極薄、延展性不足，但高溫熱熔製程可將許多有害物質破壞揮發掉，冷卻後的塗層僅剩純粹的環氧樹脂，鍵結發展完整，徹底咬合鑄鐵面，不會滲出對人體有害的揮發有機物VOCs，也沒有瀝青產品的多環芳香烴PAHs，更不會像水泥

內襯不停吐鹼，因此在輸送自來水的水質確保上，具有極大之優勢。如圖2-43所示，自1960年代迄今，全世界大約安裝了8萬公里的FBE延性鑄鐵管，可繞行地球兩周，1990年代更開發多層FBE技術，將產品線延伸到下一個世紀。

粉體塗裝鑄鐵管最大的問題，有少數來自製造瑕疵，但許多都歸責於倉儲、運搬及施工面，因為塗層很薄，稍有不慎刮破、撞裂塗裝，才導致後續的保護失效，因此材料使用的管理也是重點。

2.4 管網化學穩定性分析及內襯強度實測案例

水質穩定性：由淨水場處理後的自來水，出場的水質均能符合飲用標準，然而送入管網後，經過長時間停留在管網，或多或少會改變水質特性，某些極端的狀況甚至讓自來水變得不適合飲用，係因自來水的「穩定性」不夠。然而影響水質穩定性因素很多，例如水中微生物、管線材質、水中化學成分、水處理方式、管網調度配水模式...都會彼此影響，國外通常以「化學穩定性」及「生物穩定性」兩項來衡量管網水質是否穩定。

本研究涉及管線內襯與塗裝對於水質的影響，例如鑄鐵裸管鏽蝕、水泥內襯吐鹼、加密封塗層溶出化學物質、粉體塗裝電化學剝離...等現象，可歸類為「化學穩定性」的範疇內，許多的水質穩定評估方法與指標已經發展許久，應用也很廣泛，本節將介紹相關判別方法、國內外內襯影響水質之案例及管網擴散模擬。

2.4.1 管網中化學穩定性判別方法

單項指標：化學穩定的水代表在管網輸送中，不析出物質、不結垢、不沉澱，對管壁材質不溶解、不腐蝕的傾向。可單獨觀察某些項目判斷穩定性，比較常見的有下列幾個單項指標⁴⁰：

pH值：過高或過低都容易造成管道腐蝕，pH在多數金屬的腐蝕機制中控制著反應速率，通常pH低於7的水腐蝕性強；

鹼度(Alkalinity)：鹼度高代表碳酸氫鹽多，投入氫離子後pH波動小、緩衝能力(Buffer)大，鹼度高的水(大於80mg/L as CaCO₃)鐵離子、碳酸鈣的溶解力低，可減緩鐵管及水泥壁腐蝕；

總溶解固體(Total dissolved solid, TDS)：高濃度的TDS除了讓飲用水口感明顯變差，更會在輸配水管壁、用戶水表產生沉積垢，導致流通斷面變小，甚至使得用戶內線及熱水器產生水垢阻塞；

硬度(Hardness)：鈣鎂離子愈多的高硬度自來水(約200mg/L as CaCO₃以上)，管網內壁結垢的情況明顯、但硬度低於100mg/L，卻又容易襲奪管壁的碳酸鈣，導致內襯腐蝕崩解。

導電度(Conductivity)：透過導電度作為綜合性簡易判斷各項離子濃度增加，而其中氯離子、硫酸根是兩種比較容易引起金屬腐蝕性的物質，但如果要精確判斷，仍需實測上述兩者濃度。

由於單項指標彼此之間交互影響，有的兩項濃度同時增加，也有可能一增一減，管網化學行為複雜變數較多，不太適合只靠單項指標下定論，因此國際間結合多個單項指標，發展出綜合性指標的公式，使用比較多的有兩大類，一個是基於碳酸鈣的溶解與沉澱、另一個則是基於鐵管腐蝕傾向的綜合指標⁴³。如下圖2-44即為沉積結垢與鑄鐵腐蝕的情形。



圖2-44 兩類不穩定的水質：沉積結垢(左)鑄鐵腐蝕(右)^{41、42}

碳酸鈣綜合指標：以溶解平衡方程式建立的指數非常多，例如，

Langelier飽和指數： $LSI = pH - pH_s$

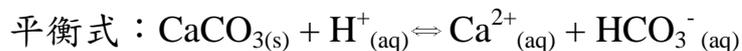
Ryznar穩定指數： $RSI = 2pH_s - pH$

Puckorius結垢指數： $PSI = 2pH_s - pH_{eq}$

Millette侵蝕指數： $AI = pH + \log(Ca \cdot Alk)$

Montgomery碳酸鈣沉澱潛勢指數： $CCPP = 100([Ca^{2+}]_i - [Ca^{2+}]_{eq})$

其中 pH_s 為水中 $CaCO_3$ 含量達到飽和狀態時的pH值，又被稱為「碳酸鈣飽和酸鹼度」，LSI、RSI、PSI都會用到， pH_s 的計算公式由下列平衡式開始推導(碳酸鈣在酸性環境的溶解平衡式)：



$$\text{平衡常數：} K = \frac{[Ca^{2+}] \cdot [HCO_3^-]}{[CaCO_{3(s)}] \cdot [H^+]}, \text{ 因固體濃度恆定，} [CaCO_{3(s)}] = 1$$

$$\text{因此：} K = \frac{[Ca^{2+}] \cdot [HCO_3^-]}{[H^+]}, \text{ 等號右邊整理拆項，}$$

$$\text{得到：} K = \frac{[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{CO}_3^{2-}]}{1} \cdot \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}^+] \cdot [\text{CO}_3^{2-}]} = K_{sp} \cdot \frac{1}{K_2}$$

K_{sp} 為碳酸鈣的溶度積、 K_2 為碳酸氫根的第二解離平衡常數，

$$\text{上式可表示為：} \frac{K_{sp}}{K_2} = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}^+]}$$

$$\text{得到：} \log K_{sp} - \log K_2 = \log[\text{Ca}^{2+}] + \log[\text{HCO}_3^-] - \log[\text{H}^+]$$
，又 $p = -\log$ ，

可改寫為： $-pK_{sp} + pK_2 = -p[\text{Ca}^{2+}] - p[\text{HCO}_3^-] + \text{pH}$ ，當達成平衡時 $\text{pH} = \text{pH}_s$ ，而 $-pK_{sp}$ 、 pK_2 兩項與溫度、TDS 濃度有關係，以 $9.3 + A + B$ 取代，且 $p[\text{HCO}_3^-]$ 為碳酸氫根濃度，即為總鹼度，以 $p[\text{Alk}]$ 取代，之後整理式子移項後，得到

$$\text{pH}_s = 9.3 + A + B + p[\text{Ca}^{2+}] + p[\text{Alk}] \dots \dots \dots (1)$$

$$A = (\log [\text{TDS}] - 1) / 10$$

$$B = -13.12 \times \log (^\circ\text{C} + 273) + 34.55$$

上式[]內的單位均是 mg/L ，欲求得 pH_s ，必須先取水樣至實驗室將 TDS、 Ca^{2+} 、Alk 三項濃度以滴定方式得出。

上列(1)式為 pH_s 的其中一個形式，可按照不同水溫依序查出 A、B 值，也有 AWWA 建議多加了其他項次的形式。使用 LSI、RSI、PSI 等指數，最複雜的就是計算 pH_s ，網路上也有人提供計算器[44]，輸入所測得之資料，就计算出數值，省下查表內差的時間。

LSI 及 RSI 本質上很相似，都只用到 pH 及 pH_s ，LSI 是 Langelier 1936 年由理論直接推導所得，學理性強，後來實際使用後，1944 年 Ryznar 加上了一些小修正成為 RSI，更能反映現場狀況，為半經驗公式。之後 Puckorius 於 1990 年再修正 RSI，提出了 PSI，他認為 RSI 使用的 pH 不能反映總鹼度帶來的緩衝效果，他以總鹼度修正的 pH_{eq} 取代 pH ，其中 $\text{pH}_{eq} = 1.465 \cdot \log[\text{Alk}] + 4.54$ 。因

修改的 pH_{eq} 與真正pH無關，所以PSI屬於純經驗公式的指數。

上述的 pH_s 計算，除了要量測TDS、 Ca^{2+} 、Alk，也要按照溫度查表，才能求取碳酸鈣飽和酸鹼度，過程十分繁瑣，Millette於1980年提出更簡單的侵蝕指數AI，是一個由LSI減化而來的公式，省去了TDS、溫度的參數，得到的結果也足以判斷運用。還有更簡單的雙參數判定法，只要測得pH及Alk就可使用的Baylis Curve，如圖2-45，在二維圖形中，兩條虛線分隔為三個區間：右上的沉澱結垢、中間的碳酸鈣平衡、左下的鈣離子溶出侵蝕，按圖索驥、簡單明瞭，無須套用計算式，不過使用場合比較受限，僅適用於特殊狀況。

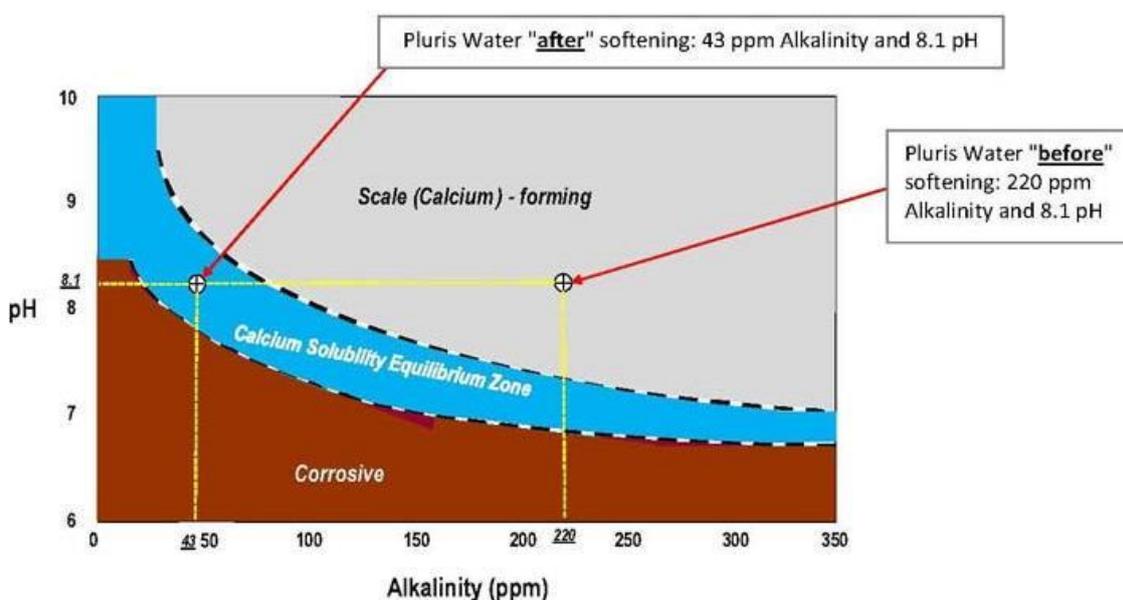


圖2-45 更簡單的兩參數判斷穩定性的「Baylis Curve」⁴⁵

許多研究人員想要更精確了解水體積內究竟能夠沉澱或者溶解多少碳酸鈣，但LSI、RSI、PSI、AI只能算出與碳酸鈣平衡點的差距，都是比較定性的指標，因此Montgomery於1985年提出了碳酸鈣沉澱潛勢CCPP，以目前鈣離子濃度 $[Ca^{2+}]_i$ 與平衡時鈣離子濃度 $[Ca^{2+}]_{eq}$ 的實際差值，可直接衡量碳酸鈣沉澱或溶解的傾向，濃度的單位也改用摩爾濃度mol/L，而非mg/L。

碳酸鈣綜合指標的意義：五種指數雖然概念相近，但判定水中碳酸鈣

是否穩定的方式不一樣，水體是否結垢或侵蝕的範圍，詳表2-5，管網與自來水的整體化學系統複雜性高，各個指數不一定都適用良好，普遍而言，不能只用單一指數就妄下定論，必須每個指數都計算並陳，才能互相比較判斷。由於RSI及PSI均是改良自LSI的指標，某些情況下會有較佳的判斷能力，甚至要搭配「單項指標」，輔以更多的資訊。

表2-5 水中碳酸鈣化學穩定性判別指數⁴³

碳酸鈣 穩定指數	含意	公式	穩定指 數值	穩定性狀態
LSI	與碳酸鈣飽和 狀態的差距值	$LSI = pH - pH_s$	<0	腐蝕
			=0	穩定
			>0	結垢
RSI	修改自 LSI 的 半經驗性指數	$RSI = 2pH_s - pH$	4~5	嚴重結垢
			5~6	輕微結垢
			6~7	基本穩定
			7~7.5	輕微腐蝕
			7.5~9	嚴重腐蝕
			>9	劇烈腐蝕
PSI	修改自 RSI 的 經驗公式指數	$PSI = 2pH_s - pH_{eq}$	<6	結垢
			=6	穩定
			>6	腐蝕
AI	LSI 的另一個 減化公式	$AI = pH + \log(Ca * Alk)$	<10	高度侵蝕
			10~12	中等侵蝕
			>12	無侵蝕性
CCPP	定量表示碳酸 鈣沉澱趨勢	$CCPP = 100([Ca^{2+}]_i - [Ca^{2+}]_{eq})$	<-10	嚴重腐蝕
			-10~-5	中度腐蝕
			-5~0	輕微腐蝕
			0~4	不結垢
			4~10	輕微結垢
			10~15	中度結構
			>15	嚴重結構

國外以LSI、RSI、PSI於淨水廠「出場水」的侵蝕性判定，運用廣泛，尤其是海水淡化廠的水，缺乏礦物質，腐蝕性很強，必須經過額外加藥調和，當三項指標均滿足控制標準，才送入管網，避免管網遭到軟水侵蝕。這三項指標也常常用於工廠循環冷卻水的定期分析，尤其是大量使用冷卻

水的重工業，若誤用易結垢的水源進入溫度高的管線，整個冷卻系統可能很快就阻塞，初期結垢層阻隔冷卻，導致散熱效率低落，後期散熱逐漸失效，系統阻塞報廢，甚至引起爆炸。此外，CCPP及AI兩個指標也很適合輔助前述三項指數，判定管網中水泥管、石綿管、水泥內襯等管線的化學穩定性，其中CCPP更是可精確定量計算鈣離子的指標。

但上述五項指標雖然有「腐蝕」及「侵蝕」的字眼，但僅限用於水泥材質的溶出析離，不適用於金屬管線的腐蝕判定。

鐵管腐蝕綜合指標：陸續有許多研究發現，基於碳酸鈣平衡所發展的一系列指數，與金屬管線的腐蝕並沒有關聯性，美國自來水協會研究基金會AwwaRF經過廣泛的研究後，在1996年建議不要再使用LSI判斷水質是否腐蝕鐵管⁴⁶，也就是LSI < 0的「腐蝕」，只對水泥砂漿、石綿水泥、混凝土...等含有碳酸鈣、氫氧化鈣、氧化鈣、矽酸鈣等含鈣材質的內襯具有「腐蝕性」。

早在1957年，Larson及Skold在分析大量鐵管腐蝕速率的數據時，發現水體中氯離子及硫酸根濃度愈高，鐵管的腐蝕速度就愈快，但是如果水中含有碳酸氫根，卻是可以抑制前兩個離子的侵蝕能力，達成緩解腐蝕的功效，因此Larson將上述發現以比例的數學式定義出鐵管的腐蝕指標：

$$\text{Larson-Skold腐蝕指標：LR} = \frac{[\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]}$$

上式三個濃度單位都是mol/L，Larson腐蝕指標考量了氯鹽、硫酸鹽會提高水的導電率，加快腐蝕速率，由於氯離子與硫酸根兩者的陰離子半徑很小，容易穿透金屬表面的氧化鈍化層，氯離子也會取代保護層內相互連結的氫鍵，引起局部的孔蝕，進而破壞金屬表面保護層。LR也是經驗指標，並非理論推導公式，必須由大量的現地數據迴歸出數據，LR愈大腐蝕性就愈高，但只要不大於0.5，就可接受，如果LR低於0.2，就視為低腐蝕性水。

LSI及LR指數較早被提出，一個是用來評估水泥內襯管是否結垢或侵蝕的指標，另一個則是無內襯鐵管是否腐蝕的指標，由於使用歷史久，某些國家的水廠甚至將LSI及LR當作控制指標，出廠前必須添加藥劑調整化學成分，以避免水質對管網造成侵蝕或者結垢，例如荷蘭的某水廠出水水質標準LSI介於-0.2~0.3、LR小於1；德國的某水廠LSI為0、LR小於1⁴⁰。

2.4.2 國外管線內襯之相關案例

荷蘭水泥內襯溶出離子的危害：1996年荷屬古拉索島(Dutch Curacao)的致死案例，為管網化學穩定性控制不當所引起的內襯溶出危害事件⁴⁷。

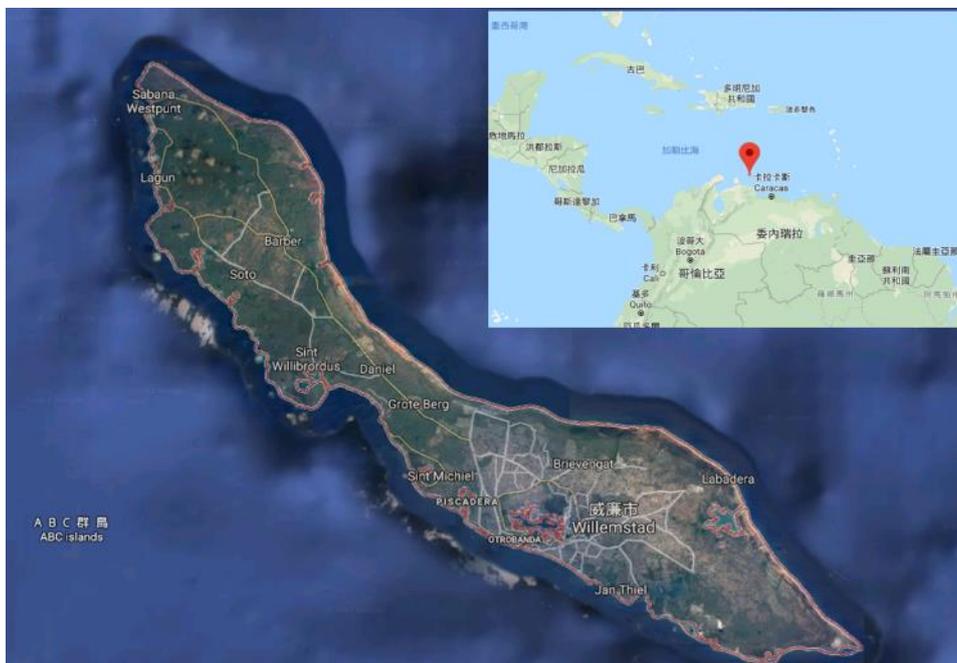


圖2-46 荷屬古拉索島的地理位置 [截圖自Google Maps]

Curacao島位於加勒比海，為荷屬ABC群島之一，1996年水公司汰換老舊管線，埋入水泥內襯DIP新管，長達2.2公里(200及150mm口徑)專供當地的賣場及洗腎中心使用。Curacao島因缺乏地表水源，當地採用蒸餾海水生產自來水，水質很棒，洗腎中心當然覺得沒必要再做一次RO逆滲透，所以連機器都沒買，他們直接使用自來水製作透析液(Dialysate)。但由於因為流量小，稀釋能力不足，水泥內襯DIP新管造成鋁離子濃度飆高40倍，導致28

個洗腎病人身體不適(急性鋁中毒)，不幸9人死亡，事後水公司縮短供水管線、旁通連接、放流洗管...四年後鋁離子才恢復到原來背景值。

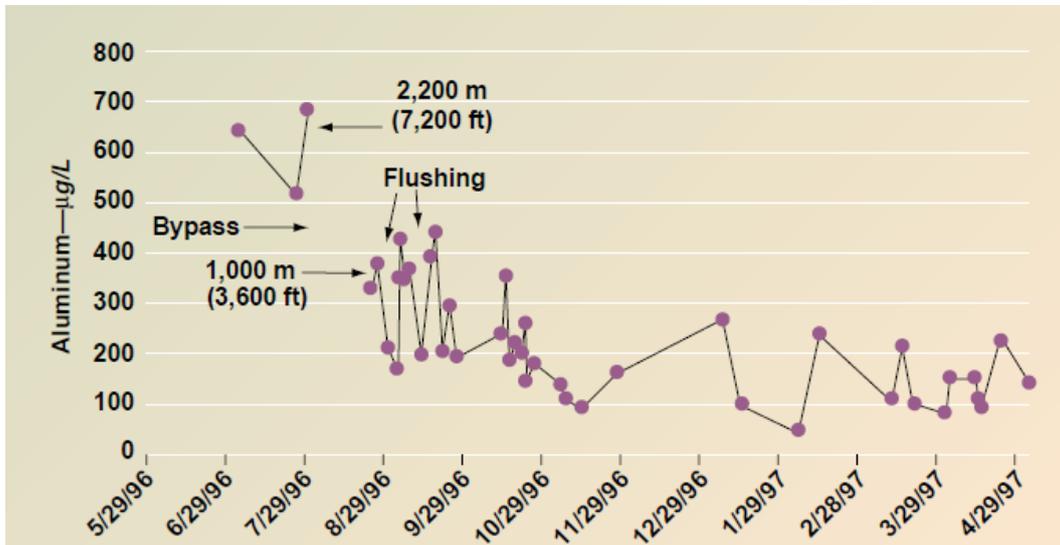


圖2-47 古拉索事件管網的鋁離子濃度變化⁴⁷

當地自來水公司使用的DIP管水泥內襯不是傳統的波特蘭水泥，而是含鋁量較多的高爐水泥或飛灰水泥(摻了鍋爐礦渣料或火力電廠集塵粉末的水泥)，溶出鋁離子的量會比波特蘭水泥來的更高，水公司分析埋入的管線，平均流量為27.5CMD，雖然不低，但夜間不用水時段管內水發生滯留。經計算，本案自來水由管線前端流到用戶端要耗費2.5日，因此自來水走走停停的過程吸收大量的鋁，而且洗腎中心一直相信自來水可以生飲，過去也沒有設置RO逆滲透裝備，讓自來水直接流入透析液製作機器，使用這種透析液的洗腎病人也沒事，沒想到水公司汰換管線的一番好意，卻引發悲劇。

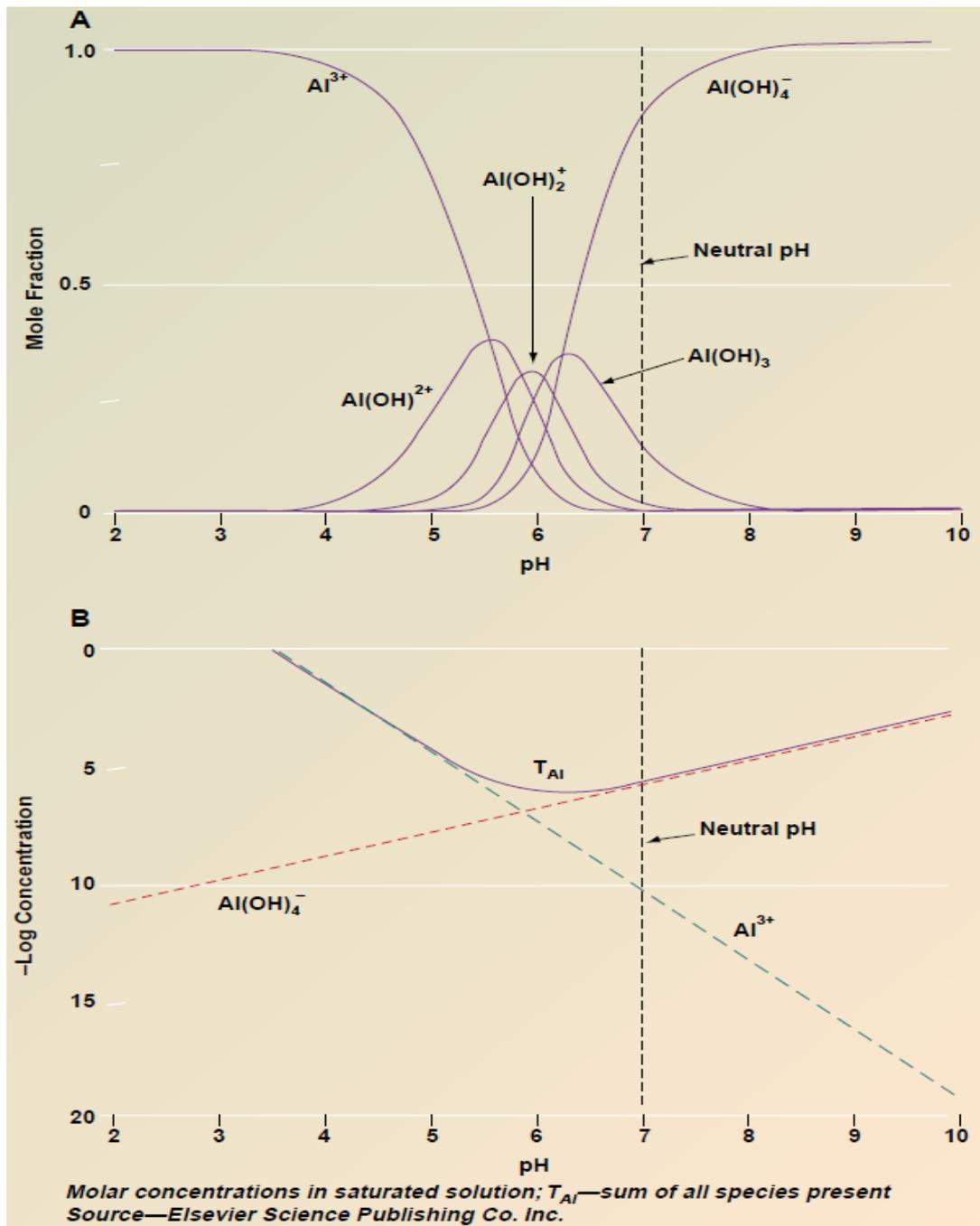


圖2-48 氫氧化鋁與鹼反應生成四羥基合鋁酸鹽溶於水中⁴⁷

荷蘭的特殊案例，係同時集合多個不利因素才會發生，蒸餾水毫無礦物質，是超軟的純水，有很強的溶解力與侵蝕力，LSI為負值，會「咬」管壁，吸收所有礦物質，而剛埋下的新管內襯，又是高爐或飛灰水泥，正好提供大量礦物質，再加上自來水流量太小、停留在新管的滯留時間太長，才會使得鋁濃度飆高，詳圖2-48，隨著內襯吐鹼pH增加，使得更多鋁離子

溶入水中。

自來水中鋁離子濃度增加，一般人喝下毫無感覺，但對身體虛弱的洗腎病人影響很大，其體內離子平衡至關重要，即使用正常的純水製作的透析液，只要電解質稍微不平衡就會導致病人抽筋、嘔吐，更何況本案鋁離子突然變化40倍，總總因素加起來，才會發生中毒死傷事件。因此國際間許多自來水公司直管改用環氧粉體內襯，美洲與歐洲部分國家陸續改用HDPE，雖然水泥內襯保護鑄鐵管避免生鏽，但在特殊狀況下，水泥會改變水質。

在臺北市中心的管網，因為接水栓數很密、用水量大，所以管線一直有水流動，即便內襯吐出礦物質，也會被稀釋掉，濃度少有超標問題，歷年的水質採樣也印證了這點。但是在特殊的地方，如平地末端、高地管線，由於用戶用水量少，自來水滯留時間長，水流入系統後，完全無法控制水質，濃度超標則是常態，改用非水泥內襯的管線，才是一勞永逸的作法。

中國上海水質化學穩定性調控：中國的水公司普遍認為水質的化學特性影響淨水場各項處理設備、管網供水系統、到用戶內線設備，因此對於水質化學穩定性的監測與調控，近年來陸續展開。飲用水水質化學穩定性與管網的腐蝕、結垢、及管壁溶出等水質污染有關，雖然採用水泥砂漿、環氧樹脂或粉體內襯金屬管可解決管網化學穩定性的問題，但是內襯材料的脫落又會引起金屬管的繼續腐蝕，如果要將既有不穩定管材汰換改造，費用很驚人又耗時，用戶端的管線也不是水公司單方面能夠處理的。因此在水處理流程中進行水質化學穩定性的控制變得比較實際。

控制化學穩定性的方法有調整pH、鹼度、硬度、投入腐蝕抑制劑(聚磷酸鹽、矽酸鹽、正磷酸鹽)，但添加上述化學藥劑卻又會影響其他水處理結果，減損消毒劑效果，甚至不符合飲用水水質標準，即便滿足飲用標準，

也很難同時滿足其他需求，例如想提高硬水的pH，但隨著藥劑量增加，水質就開始軟化，也不易一次加藥同時控制不同材質的腐蝕，因水廠、管網及用戶內線材質五花八門，有黃銅管、紫銅管、鐵質管、鍍鋅管、鉛管、不鏽鋼管、水泥管，每一種材質的最適化學穩定指標也不盡相同。

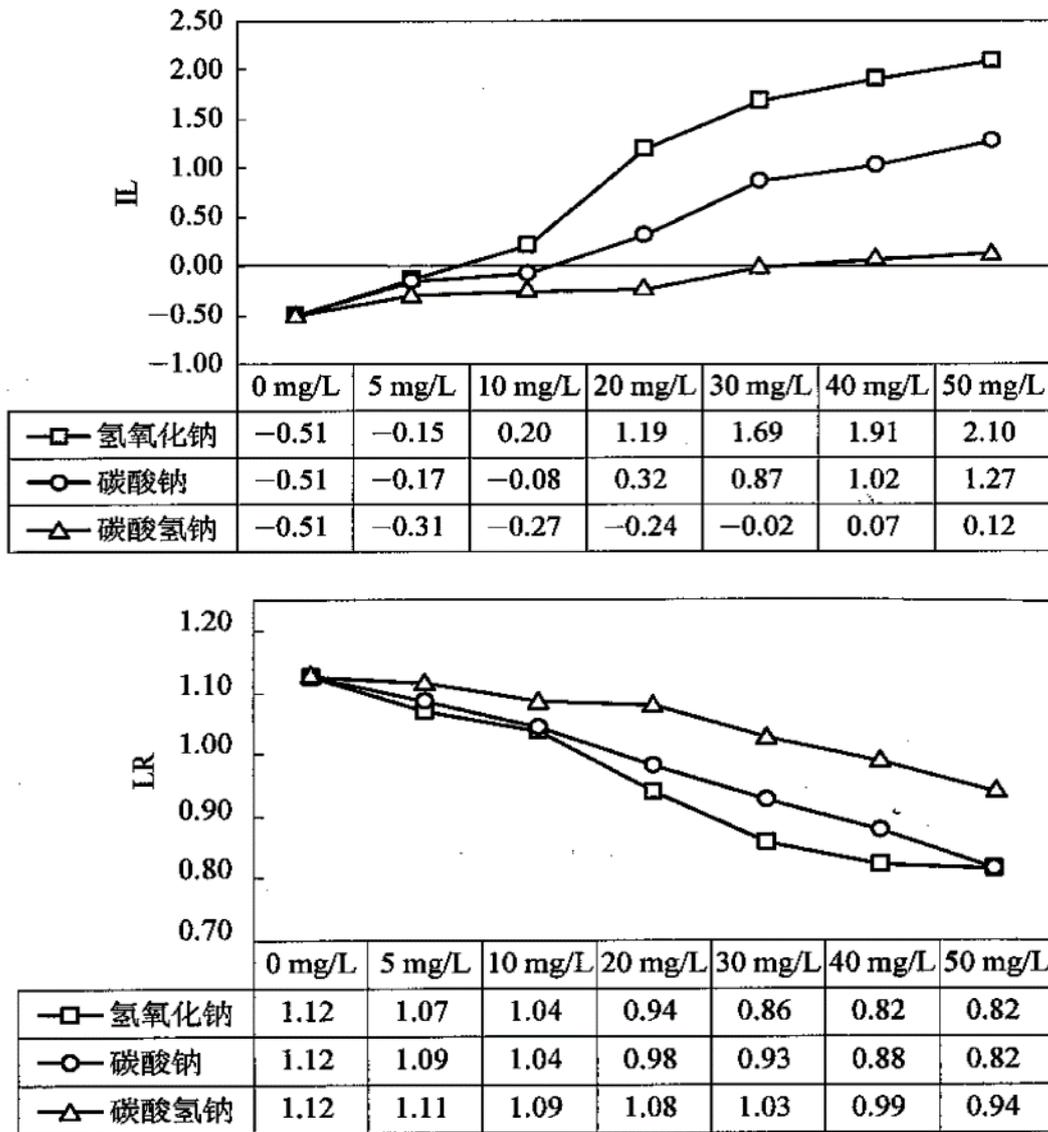


圖2-49 投入不同鹼劑對LSI(上)及LR(下)的影響⁴⁰

最普遍使用的是鹼劑，可調節pH值、增加鹼度，對管線的保護較有實證效果，通常使用的鹼劑為氫氧化鈉、碳酸鈉、碳酸氫鈉三種，對水質化學穩定性影響如圖2-49所示，中國常用的是LSI及LR兩項指標。此外，投入鹼劑卻會減損消毒劑的功效，讓管網的餘氯不足，輸送自來水的過程失去

應有的保護，經過試驗發現先加入與後加入鹼劑的結果也不太一樣，如圖2-50所示，但不能一體適用，每個水廠都要找出屬於自己的最適加藥模式。

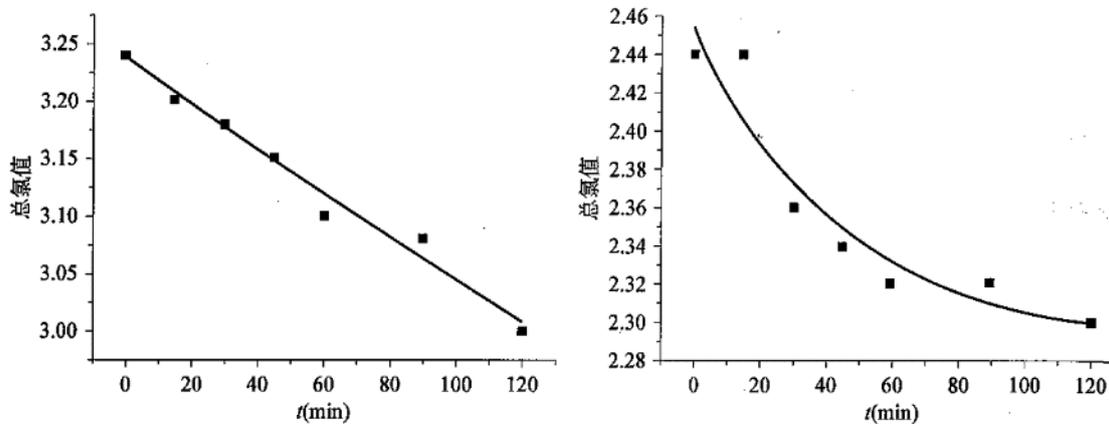


圖2-50 鹼劑先加(左)及後加(右)對次氯酸鈉衰減的影響⁴⁰

若原水的水質發生改變後，投藥的方式也要跟著調整，例如上海市區原本主要由黃埔江取水，於2011年改為長江河道中的青草沙水庫供水，原水水質發生改變，投藥方式也稍作調整，送入管網後，各個管網取樣點的LSI及LR指數如圖2-51所示，水源更換前水質比較軟，LSI的負值比較大，對水泥內襯的侵蝕性較高，改為長江水之後，水質較硬，LSI負值變小，侵蝕性下降，但更換前後LR變化不大，雖然指數稍微下降，但仍遠大於0.5，代表兩種水源對金屬裸管的腐蝕性偏高。此外，自來水送入管網後，由各個取樣點的化學穩定性指數，可發現隨著在管網的輸送距離愈遠，LR有增加趨勢，水質對鑄鐵裸管的腐蝕性愈來愈顯著，雖然LSI雖變化不大，對水泥內襯的侵蝕性不變，但仍顯示管網內襯溶出物確實改變了水質，除非在管網內二次加藥，否則甚難於水廠端一次性投藥解決。

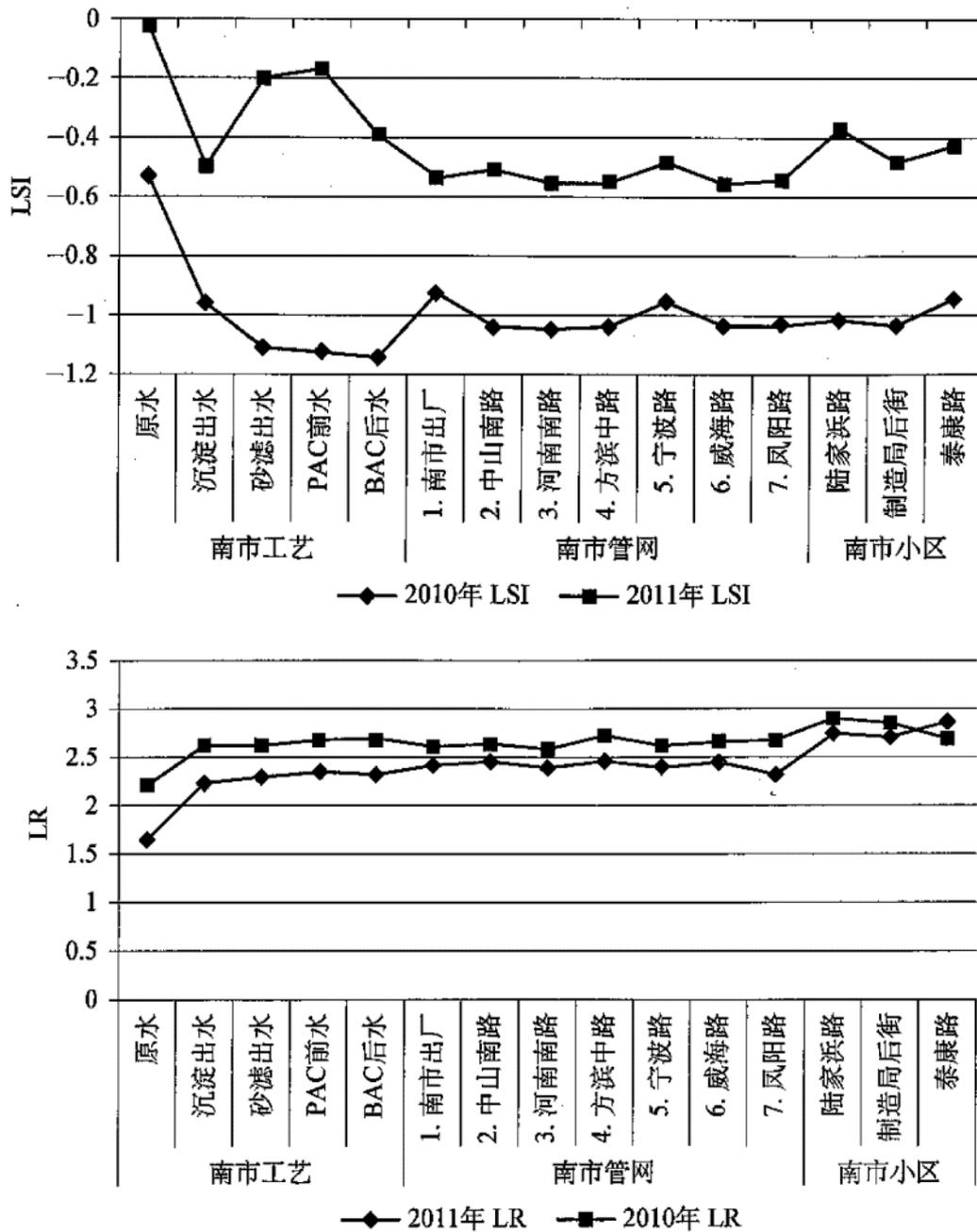


圖2-51 上海南市水廠更換水源前後管網內部LSI及LR變化⁴⁰

2.4.3 粉體塗裝抗剝離強度試驗

塗裝強度之重要性：粉體塗裝內襯鑄鐵管具有很多的優點，內襯材質不會溶出鹼性物質，也不會釋放PAHs、BTEX、VOCs、SVOCs等化學物質，粉體厚度較薄不減損流通斷面，且表面光滑摩擦損失低，但唯一的缺點，就是粉體剝離的問題。由於粉體塗裝製造有許多步驟，如果某個步驟有製

程瑕疵，就可能造成粉體對鑄鐵壁的黏結力(Adhesion)不足，或者粉體材質之間的凝聚力(Cohesion)低落，而導致安裝後粉體吸水弱化、剝離崩裂等情況，喪失對管壁的保護，讓鑄鐵管開始生鏽腐蝕，剝離的粉體碎片也會隨水流四散，阻塞管道、閥件、水表，微小的碎片甚至穿過水表濾網流入用戶水池。如圖2-52所示。

由前幾節的相關文獻回顧可以了解粉體塗裝的失效原理，粉體吸水弱化雖然會導致水份滲透接觸管壁，讓鑄鐵開始起化學反應，產生起泡並蓄積鹼水，但是如果粉體黏結力仍足夠，起泡的體積不會擴大，將會形成穩定的自我維持機制(Fail Safe)，內部鹼水保護管壁避免進一步的鏽蝕，讓鑄鐵管繼續使用20~30年不成問題。然而檢視許多粉體塗裝失敗的態樣，都是黏結力不足，隨著管中水流沖刷，管壁粉體開始整片脫落，根本沒辦法構建鹼性的自我維持機制。因此粉體管製品應當經過抗剝離強度檢驗，方能確保品質、長久使用。

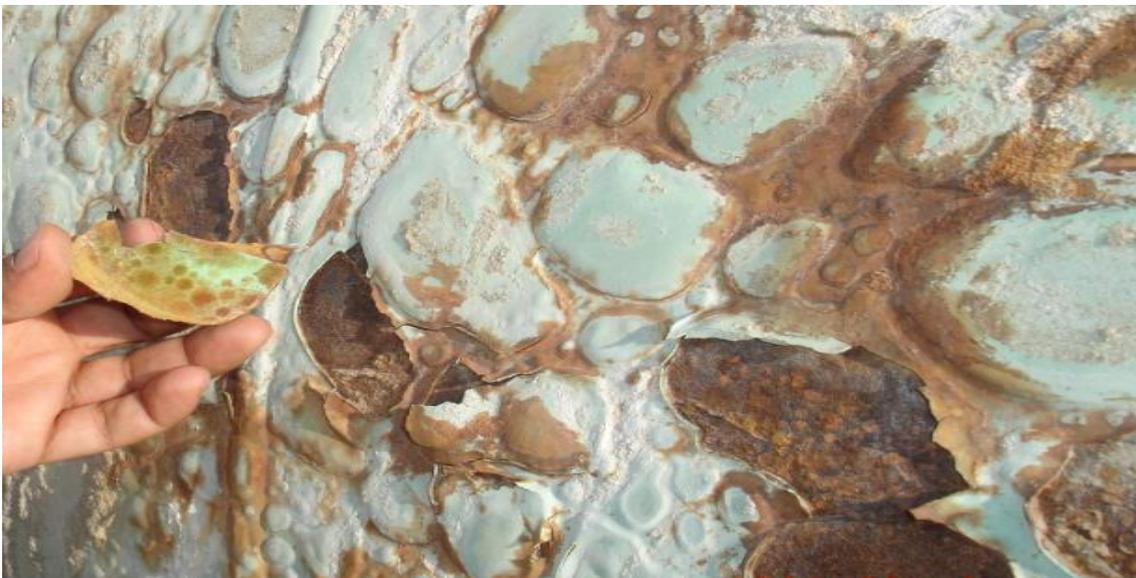


圖2-52 粉體塗裝起泡後再發生剝離導致鑄鐵失去保護⁴⁹

試驗方式與種類：塗料的黏結力量測有很多試驗方法(詳圖2-53)，例如交錯切割試驗(Cross-Cut test)、刮除測試(Scrape/Scratch test)、剝離測試

(Peel-off test)、拉拔測試(Pull-off test)，每一種試驗都有國際標準組織ISO的規範或工業大國之國家標準可供參考，如美國ASTM、德國DIN、英國BS、中國GB、歐盟EN...等等，目的是讓試驗結果具有一致性與可靠性，能夠互相比較，甚至當作材料的製造品管及交貨驗收標準。

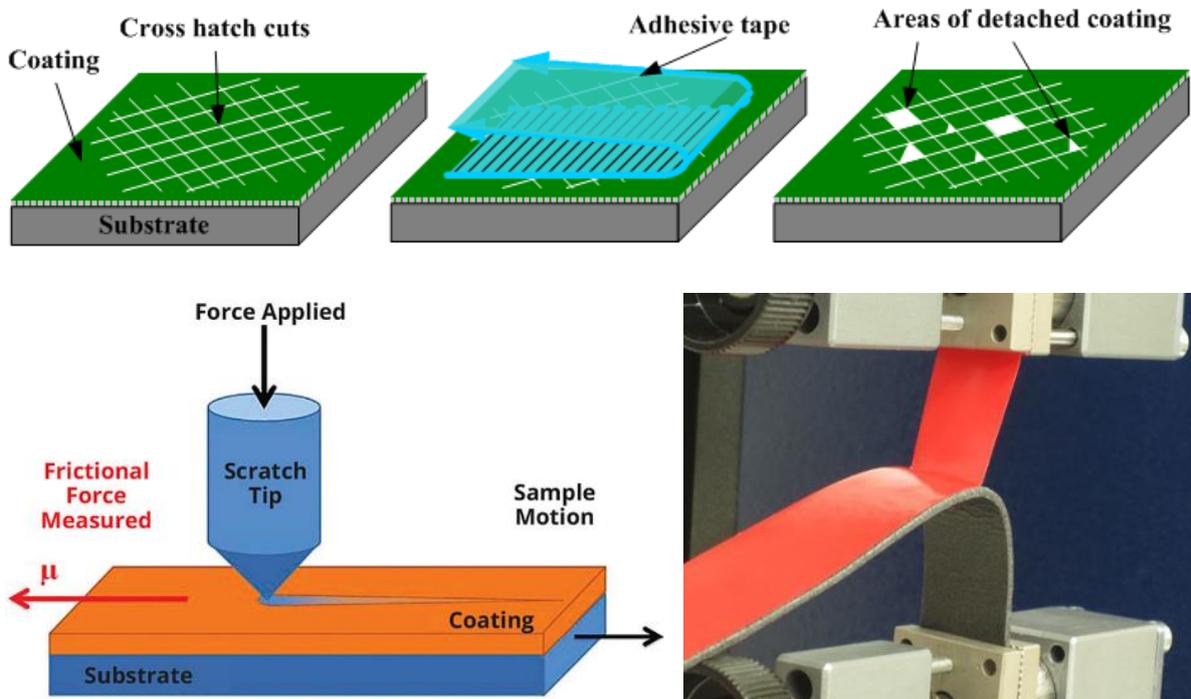


圖2-53 交錯切割(上)、刮除(左)、剝離(右)等試驗^{50、51、52}

諸多黏結力試驗中，拉拔試驗是比較常用的試驗法，相較於上述幾種方法，拉拔試驗可以明確定量，而且採用垂直於塗層方向拔開，可測得出塗層完整的強度，比其他的試驗法有更高的拉力數值。目前ISO 4624、ASTM D4541兩個類似的國際標準是最常被參採的，其中ASTM的標準更進一步規範了五種拉拔儀器，讓儀器製造商及使用者更有依循的準則，如圖2-54，就是其中一類獲得認可的儀器，如：端子(Dolly)尺寸、黏膠(Adhesive/Glue)種類、拉拔器(Detacher)構造...等裝置及耗材都有細部的描述。

ASTM D4541使用可攜式儀器量測塗層拉拔強度(Pull-off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers)：相較於ISO 4624拉拔試驗規範比

較偏向原則性說明，並沒有推薦儀器種類，如果需要，則由測試的雙方共同議定儀器形式，只要滿足規範的一些準則即可，而ASTM的細節較多，規範更詳盡，不同試驗者能依標準進行實驗，比較不會「各說各話」，然而ASTM允許使用的五種儀器，頗此間的數據卻差異很大，而且不能換算，這五種儀器Type I、II屬於必須手動調整端子與拉拔器至對心的儀器(Fixed Alignment)，如果有一點偏斜，拉拔方向就不會平行於表面，會造成由一側先撕開塗層，測得之拉力強度將較實際值為低，Type III、IV、V則是拉拔器會卡入端子自動對心的儀器(Self-Alignment)，即便稍有不平，仍可以垂直表面的方式，整片拉起，由於塗層拉力強度受到的影響因子很多，即便同一種塗層，塗佈方法也相同，但基質不同(例如由鑄鐵改成銅管)，拉拔強度就會有顯著差距，如果又考慮不同儀器端子的大小、厚度、接觸面積的不同，更會讓測試結果變異性大到無法比較，因此用同一款儀器與同一尺寸端子做出的數據，才能夠互相比較。

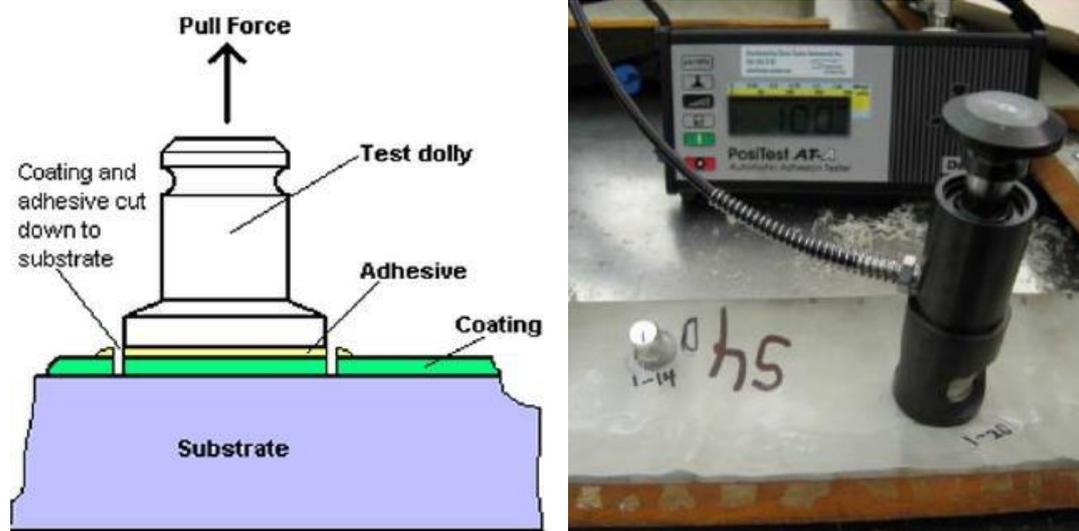


圖2-54 符合ASTM規範的其中一種拉拔試驗設備⁵³

試驗程序為先將端子上膠黏上塗層，利用切環器(Circular Hole Cutter)於端子週邊將塗層刮除，露出最底層，環切(Scoring)完成後，如圖2-54左圖，再套上拉拔器，將端子拉開，施力的速度不可大於1 MPa/s，並於100秒內結

束(ISO時限為90秒)。



將拉拔器中心軸插入端子，並頂住管壁，以提供拉拔反力。拉拔器的抓環(Grip)咬住端子外側凹溝，隨著轉動液壓器，端子承受上拔力將漸漸增加，直到拔斷脫離

圖2-55 由ASTM認可的Type III自動定心拉拔器及其設備⁵⁴

如果時限內仍未拉斷，則停止施力，紀錄當下拉應力數值。ASTM建議同一個塗層應至少做3個試點(ISO則建議20mm直徑的端子，必須做6次，如果使用7mm直徑的端子，則要測10次)，而且不可選擇太靠邊緣的塗層，通

常邊緣所測數值比實際強度低。此外ISO也建議塗層厚度要量測並紀錄，試驗溫度控制在 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相對溼度為 $50\pm 5\%$ ，但ASTM並未強制規定。圖2-55則是ASTM認可的Type III自動定心拉拔器及其設備，具備平面及曲面端子，可量測管線內襯及外壁塗層拉拔強度。

至於是否環切(Scoring)，ASTM及ISO見解不同，ISO認為均要先黏端子再切環，因為切斷塗層才能正確量測端子下方材料的拉力強度，防止額外的抵抗力影響試驗，ASTM則認為環切可能產生塗層上的微小裂縫，進而減損拉拔強度，與現地(In-situ)狀況有差異，但不禁止切環，除了環切過程必須謹慎不可產生裂隙，更必須在報告中載明。ASTM也說明於水泥系基質的塗層拉拔試驗，通常都要環切，主要是破壞面都在軟弱的基質，如果不環切，斷裂面積反而不好控制在端子下方，反倒可能延伸出去，導致試驗數值有誤。ISO與ASTM都認同以很細的砂紙輕輕打磨塗層表面，以去除污漬、增加端子上膠後的黏著力，但不能造成裂縫。

破壞類型：端子拉開後，除了要紀錄當下的拉應力(以MPa計)，更要目視評估端子底下的塗層破壞的類型，以概估的方式描述各塗層與底部基質之凝聚力、黏結力破壞面積比例，如圖2-56上圖，為單純於單一塗層斷裂的材料凝聚力破壞(Cohesive Failure)，或兩個塗層間分離的黏結力破壞(Adhesive Failure)，但也有時候會發生破裂面通過兩個材料層，此時就必須將端子反過來仔細觀察破裂面積，並於報告中以百分比的方式陳述破壞比例，如圖2-56左下圖，兩種塗層沒有界面的分離，正好都斷在材料內部，屬於凝聚力破壞(Cohesive Failure)，而且各斷掉50%的面積。

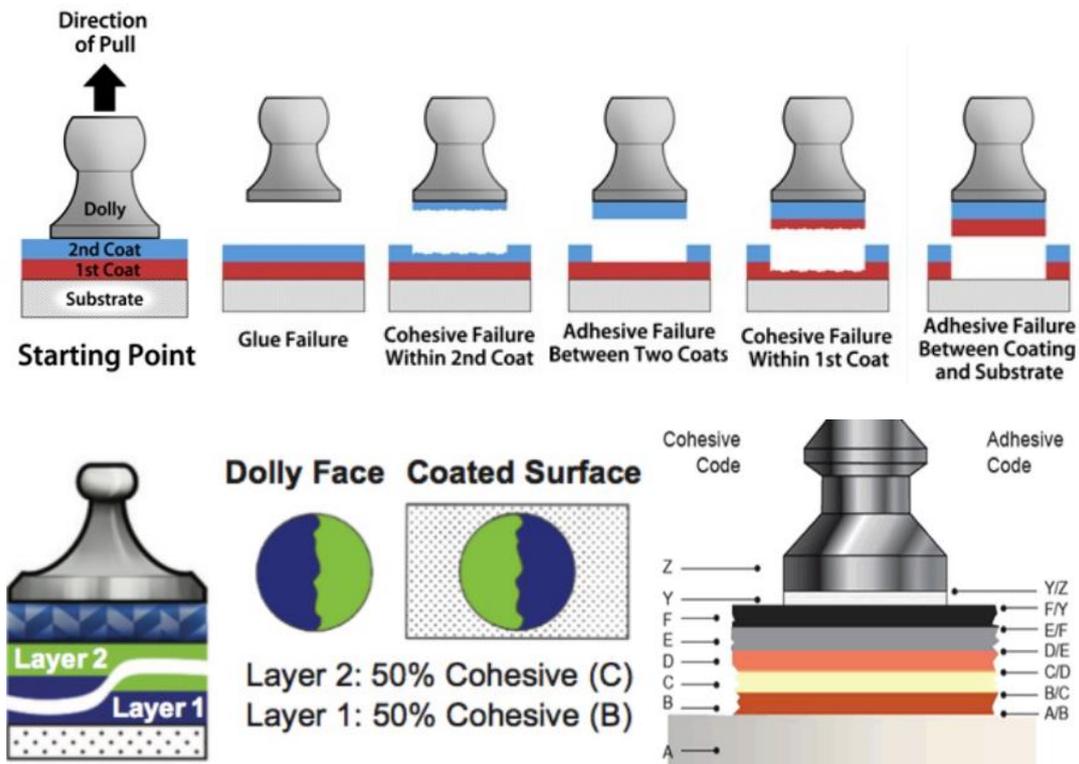


圖2-56 各層符號定義(右下)破壞模式紀錄(上，左下)⁵⁵

如果塗層很多層，為了方便描述破壞狀況，ASTM建議必須先以英文符號定義各層代號，詳圖2-56右圖，如果屬於塗層內斷裂的凝聚力破壞，則以B、C、D...描述斷裂的層次，如果是塗層間分離的黏結力破壞，則以A/B、B/C、C/D...方式描述分離的位置。

國外測試案例：隸屬於美國運輸部的管線及有害物安全管理局2010年曾經委託DNV公司針對粉體塗裝剝離等問題提出研究報告⁵⁶，該研究除了從現地挖取使用中管線，對其外壁粉體進行拉拔試驗，也拿了多根新管對表面粉體劣化處理再進行拉拔試驗。以了解狀況良好以及狀況差的粉體塗裝，彼此強度差異。該研究報告使用ASTM D4541作為拉拔試驗標準，雖然並沒有提到使用何種Type的儀器，但由照片的端子外型，詳圖2-57，可判斷為液壓型的Type V、實心構造的端子，屬於自我對心的拉拔器。該研究使用的端子尺寸為14、20及50mm，穿插著使用(但應使用單一尺寸才能避免「尺度效應」所導致的數據變異性)。此外，DNV的所有測試結果並未以公制MPa

表達，而是以psi的英制單位呈現，因此所有的拉應力數據需除以145，才會轉換成MPa。

DNV所測試的管線屬於油氣類，外部防腐蝕比起內部更為重要，因此本研究全部的試驗都是外壁粉體拉拔，表2-5為DNV Columbus Inventory公司的20年管線拉拔實驗結果。雖然DNV對實驗沒有太多經驗，而且並未完全按照ASTM的規範進行試驗及描述數據，但資料仍具參考性。管線雖然有曲度，但DNV認為很平坦，所以全部均以平面端子黏貼，而且同時混合使用14及20mm兩種直徑的端子，測試之粉體種類有4種。結果粉體強度很令人驚豔，只有3個試驗是粉體黏結力破壞(DNV標註為Coating Failure)，特別以紅字顯示，其餘44個拉拔試驗，有的為拉拔時間到100秒沒有破壞(No Failure)或拉不起來(Could not pull off)，不過最多的仍是斷裂在黏膠(DNV標註為Adhesion Failure)，若以三個成功測出粉體黏結力試驗，最小強度為1466 psi(10 MPa)。



圖2-57 DNV公司以Type V型的拉拔器測試粉體強度⁵⁶

表2-5 使用20年粉體管外壁狀況良好之處的拉拔試驗⁵⁶

Table 1. Results of Pull Off Adhesion Tests on Pipe ID FBE # 3

Dolly #	Dolly Size	Location	Strength	Epoxy Type	Failure Type
1	14mm	Flat Surface	1735psi	Huntsman 8595	No Failure
2	20mm	Flat Surface	3302psi	Huntsman 8595	No Failure
3	14mm	Flat Surface	3620psi	Huntsman 8595	No Failure
4	14mm	Flat Surface	2142psi	Huntsman 8595	No Failure
5	20mm	Flat Surface	6632psi	Huntsman 8595	No Failure
6	20mm	Flat Surface	2680psi	Huntsman 8595	No Failure
7	14mm	Flat Surface	3388psi	Huntsman 8595	No Failure
8	14mm	Flat Surface	3028psi	Huntsman 8595	No Failure
9	14mm	Flat Surface	3734psi	Huntsman 8595	No Failure
10	20mm	Flat Surface	2518psi	Huntsman 8595	No Failure

Table 2. Results of Pull Off Adhesion Tests on Pipe ID FBE # 3

Dolly #	Dolly Size	Location	Strength	Epoxy Type	Failure Type
1	14mm	Flat Surface	2376psi	Huntsman 2022	Coating Failure
2	14mm	Flat Surface	3497psi	Huntsman 2022	Could not pull off
3	14mm	Flat Surface	4144psi	Huntsman 2022	No Failure
4	14mm	Flat Surface	2768psi	Huntsman 2022	No Failure
5	14mm	Flat Surface	3618psi	Huntsman 2022	No Failure
6	14mm	Flat Surface	2124psi	Huntsman 2022	No Failure
7	14mm	Flat Surface	3510psi	Huntsman 2022	Could not pull off
8	14mm	Flat Surface	3820psi	Huntsman 2022	No Failure
9	14mm	Flat Surface	4218psi	Huntsman 2022	No Failure
10	14mm	Flat Surface	1500psi	Huntsman 2022	No Failure

Table 3. Results of Pull Off Adhesion Tests on Pipe ID FBE # 11

Dolly #	Dolly Size	Location	Strength	Epoxy Type	Failure Type
1	14mm	Flat Surface	1131psi	8595	Adhesion Failure
2	14mm	Flat Surface	2892psi	8595	Adhesion Failure
3	14mm	Flat Surface	2436psi	8595	Adhesion Failure
4	14mm	Flat Surface	2176psi	8595	Adhesion Failure
5	14mm	Flat Surface	1272psi	8595	Adhesion Failure
6	14mm	Flat Surface	1558psi	2022	Adhesion Failure
7	14mm	Flat Surface	3336psi	2022	Adhesion Failure
8	14mm	Flat Surface	3092psi	2022	Adhesion Failure
9	14mm	Flat Surface	2118psi	2022	Adhesion Failure
10	14mm	Flat Surface	4088psi	2022	Adhesion Failure
11	14mm	Flat Surface	1466psi	2022	Coating Failure
12	14mm	Flat Surface	2454psi	2022	Adhesion Failure

Table 4. Results of Pull Off Adhesion Tests on Pipe ID FBE # 12.

Dolly #	Dolly Size	Location	Strength	Epoxy Type	Dolly #
1	14mm	Flat Surface	1284psi	2022	Adhesion Failure
2	14mm	Flat Surface	2720psi	2022	Adhesion Failure
3	14mm	Flat Surface	2562psi	2022	Adhesion Failure
4	14mm	Flat Surface	2364psi	2022	Adhesion Failure
5	14mm	Flat Surface	2576psi	2022	Adhesion Failure
6	14mm	Flat Surface	3278psi	2022	Adhesion Failure
7	14mm	Flat Surface	2982psi	2022	Adhesion Failure
8	14mm	Flat Surface	952psi	2022	Adhesion Failure
9	14mm	Flat Surface	1344psi	2022	Adhesion Failure
10	14mm	Flat Surface	2308psi	8595	Adhesion Failure
11	14mm	Flat Surface	1916psi	8595	Coating Failure
12	14mm	Flat Surface	3256psi	8595	Adhesion Failure
13	14mm	Flat Surface	972psi	8595	Adhesion Failure
14	14mm	Flat Surface	1776psi	8595	Adhesion Failure
15	14mm	Flat Surface	1806psi	8595	Adhesion Failure

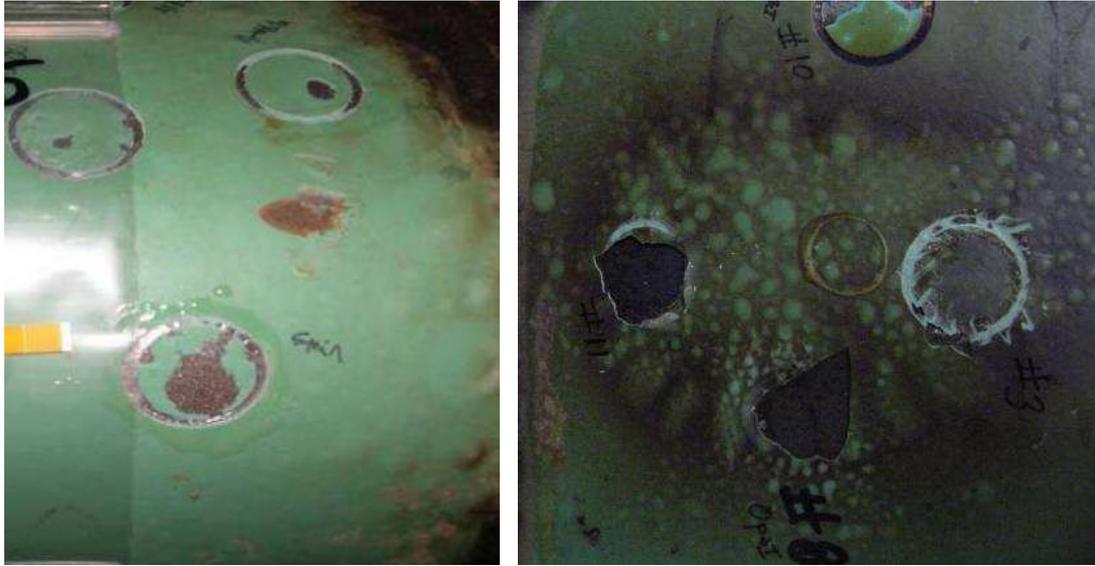


圖2-58 狀況良好(左)及刻意加工致起泡(右)做拉拔試驗⁵⁶

最大為2376 psi(16.4 MPa)，強度很高，其餘破壞在黏膠或根本拉不斷的試驗，則間接證明粉體的黏結力很強大，即便已經使用了20年之久，該報告也說新管的粉體拉拔強度約介於4000~6000 psi(27.6~41.4 MPa)，試驗結果證明20年老管線粉體雖有衰退但仍具有很高的強度。由於自現場開挖取得之管件遍尋不著「起泡」劣化的粉體管壁，沒辦法測試起泡處的粉體強度，DNV異想天開使用噴槍烘烤讓表面起泡，詳圖2-58右圖，做出來的強度很低，四組有效試驗介於104~768 psi之間，但由於這與粉體泡水後，水分滲透至鑄鐵面然後發生化學反應所產生的「起泡」機制完全不同，因此不能代表真正起泡處的強度。

DNV也想了解粉體與管壁咬合的顯微構造，因此找了一處粉體與鑄鐵面分離的拉拔試驗凹洞，灌注樹脂取得陽模，如圖2-59右圖，在電子顯微鏡下發現表面粗糙，代表當時粉體管件熱熔前曾以石英砂噴射去污並產生了粗糙面，才讓粉體咬合良好。

此外DNV也對新管線的粉體以加速氧化、氯化鈉噴塗、泥土污損等方式劣化處理後，連同原始新鮮狀態的粉體，一起進行拉拔試驗，以比較粉體加速劣化的結果，結果如圖2-60所示，其中新管的原始粉體強度為3900

psi(26.9MPa)，而粉體弱化最快、強度最低的為氯化鈉噴塗這一組，僅剩1500 psi(10.3MPa)。氯化鈉的劣化能力最強，結果並不令人意外，由於氯離子的分子很小，很容易貫穿粉體，直達鑄鐵表面發生化學反應。而且加速劣化的方法，更是以極端狀態進行反應，首先以濃度為0.5M的氯化鈉溶液噴塗於乾淨的粉體表面，然後送入烤箱加熱到100度，讓水分徹底滲入粉體，之後水份完全揮發後在表面留下一層薄鹽，經過如此處理，當然使得粉體特別容易剝離，在短時間內加速粉體劣化，以模擬最為極端的情況。

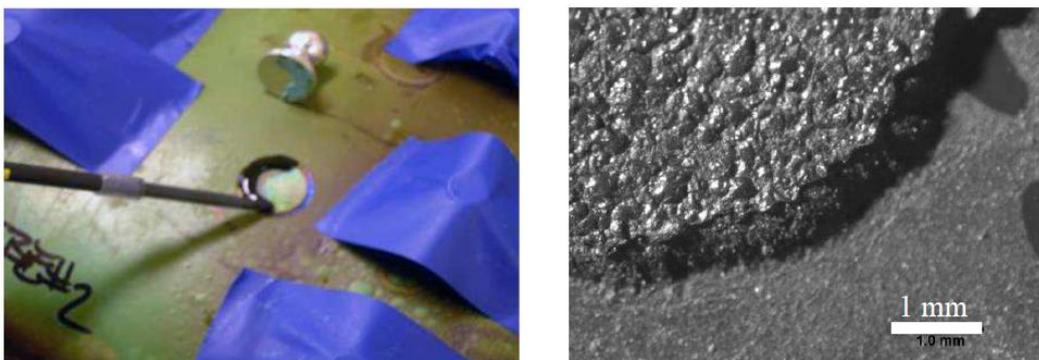


圖2-59 於粉體與鑄鐵破壞面灌注樹脂翻模表面構造(右)⁵⁶

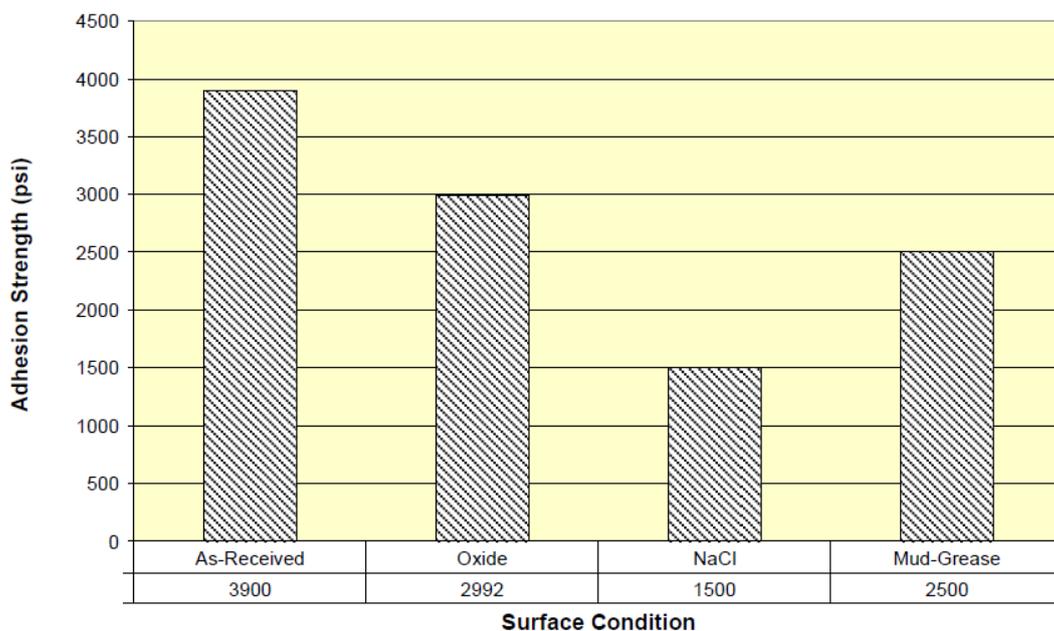


圖2-60 三種加速劣化與原始狀態的粉體拉拔強度數據⁵⁶

對於粉體塗裝內襯弱化的研究，國外還有以濃度5%的氫氧化鈉NaOH在200°F(93°C)的溫度下，連續浸泡粉體試片30日，然後取出依據ASTM的

試驗規範進行的拉拔研究⁵⁷，試驗結果顯示如圖2-61，浸泡前強度高達23.8 MPa，且破壞並非在粉體內、也非粉體及鑄鐵面分離，而是試驗經過100秒後，卻拉不斷或者斷在端子黏膠，代表粉體本身凝聚強度及黏結力都很足夠。

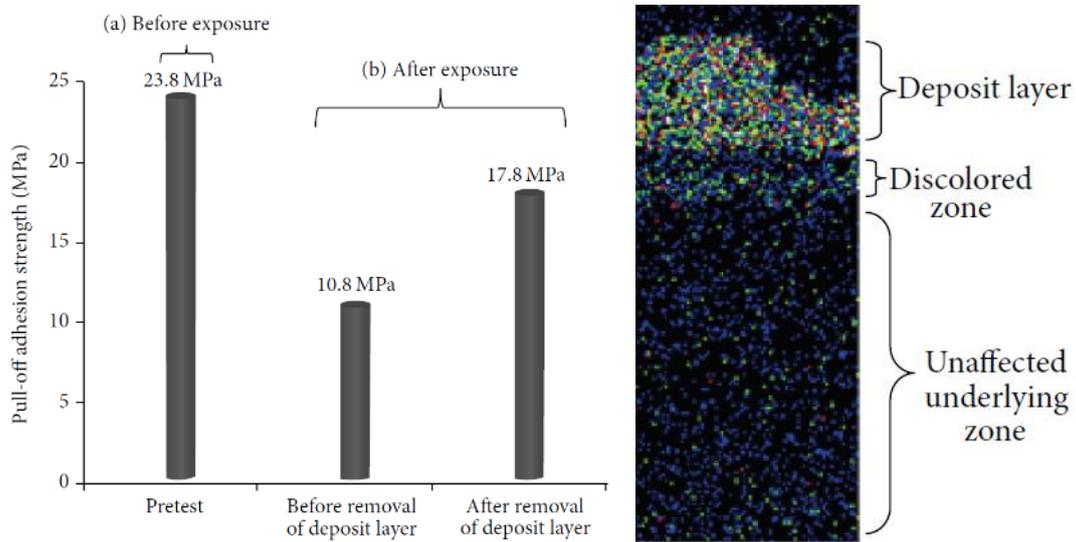
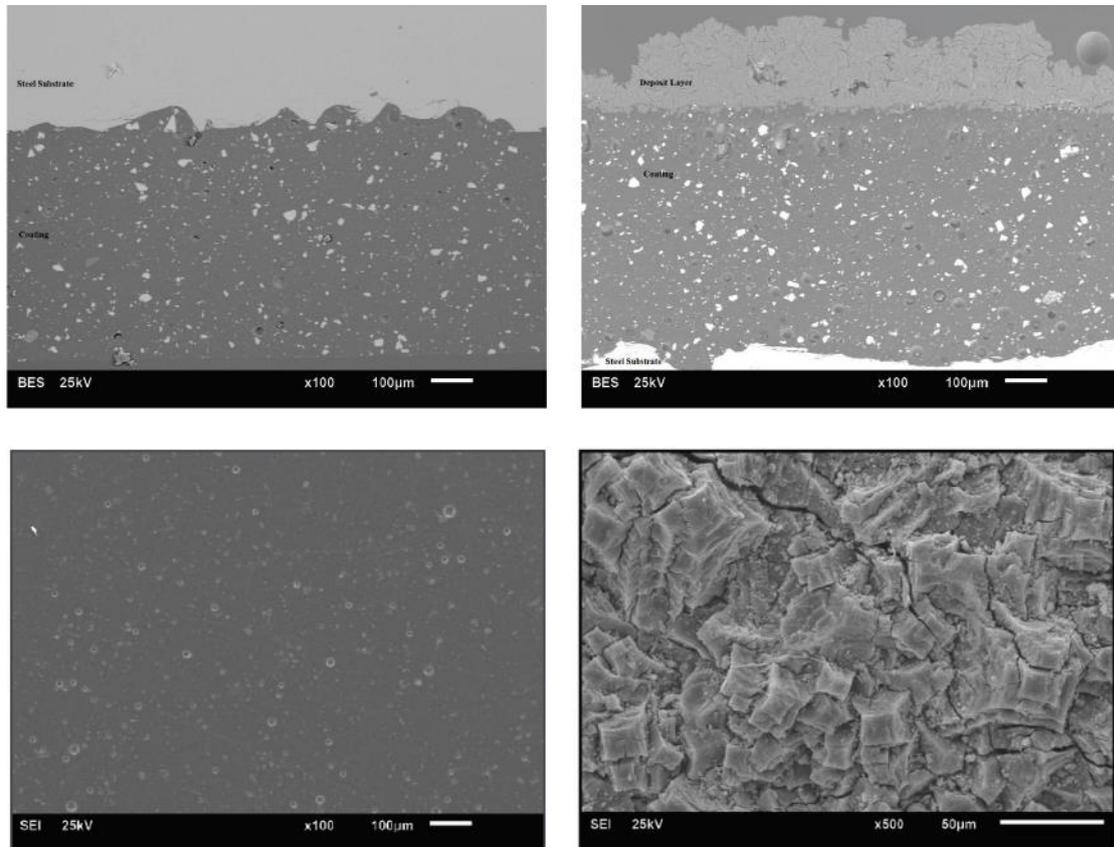


圖2-61 浸泡NaOH加速劣化前後的粉體強度及弱化層⁵⁷

經過浸泡高溫氫氧化鈉溶液30日之後，首先會在粉體表面形成一層沉積物(Deposit layer)，詳圖2-61右圖，如不刮除就直接進行拉拔，斷面都發生在這層弱面，呈現凝聚力破壞，強度僅有10.8 MPa，如果將表層沉積物弱面刮除，再進行拉拔，則強度稍微提升至17.8 MPa，但整體粉體強度已經弱化，無法回到原始強度了。上述強度數值均是一式三份(Triplicate)的試驗平均值。

若將浸泡NaOH前後的粉體以掃描電子顯微鏡(SEM)觀察其剖面及表層構造，如圖2-62，很明顯表層多了一些結構比較脆弱、疏鬆的沉積物，在沉積物中間還有多道明顯裂縫，代表粉體開了道口，讓外部物質逐漸滲透進來，隨著浸泡時間增加，被NaOH弱化的粉體塗裝層將愈來愈深，不過NaOH並未直接滲透到底層與鑄鐵表面進行反應，所以沒有泡泡(Blister)產生，因此浸泡高濃度NaOH似乎與泡泡生成的機制無關，反倒是DNV所試驗的高濃

度NaCl似乎才有這樣的功效，氯離子可以直接貫穿粉體接觸鑄鐵層，讓拉拔試驗都是剝離態樣的Adhesion Failure。



上圖：粉體剖面掃描，下圖：粉體表面掃描

圖2-62 浸泡NaOH劣化前(左)後(右)粉體電子顯微鏡掃描⁵⁷

數據間的比較與參考：可惜的是，前篇論文遍尋不到任何有關拉拔器的介紹及相關照片，不確定作者使用哪一種拉拔設備，所以其拉拔數據仍然難以與他人比較運用，因為即便ASTM D4541允許採用的Type I~V試驗儀器，對相同粉體做出的拉應力強度都有些許的不同，所以數據間的比對，最好使用同一個Type的儀器來做。即便如此，ASTM D4541規範表明了以同一種儀器拉同一種粉體，都有不可避免的誤差，ASTM甚至比對了實驗室內部(Intra-laboratory)同一批人用著完全相同的儀器產生之數據群，以及不同實驗室間(Inter-laboratory)不同批人用同一個Type但不同的儀器所產出的數據群，發現兩個數據群的變異係數(Coefficient of Variation, CV)高達12.2%及

20.6%，這代表拉拔試驗雖然可以給出粉體強度的定量數據，但是因為粉體、基質、儀器、人的不確定性彼此累積，導致不可忽視的變異性，甚至於ASTM D4541規範內訂定了任兩個拉拔數據的相對差率(Percent Relative)之容許最大差距，如果相對差率計算結果超標，將有95%的信心認為這兩個數據有問題，最好重作試驗。因此，任何使用及參考以ASTM規範產出的拉拔數據，都必須十分謹慎，不能只看到別人做出的一個數據就妄下判定，所以ASTM要求要一式三份(Triplicate)，每個塗裝至少做三次，而ISO 4624更是希望能達到六次的重複試驗，以降低不確定性。

2.5 地下管線之抗震措施

若能克服管材銹蝕的問題，國內外諸多運用經驗均指出鑄鐵管使用40年不成問題，甚至在特定環境下超過百年仍然堅固耐用。然而若管線遭遇地震的動態外力，狀況就截然不同，地震導致的地層錯動變位、震波搖晃產生管線的額外應力應變、甚至高地下水位場址激發孔隙水壓而發生的土壤液化...等等，均會使鑄鐵管提前損壞。臺北位於環太平洋地震帶上，地質狀況特殊，不但屬盆地地形，地下多為軟弱沉積土層，並有活動斷層通過，諸多不利的地震情境均可能發生，因此了解鑄鐵管受振的反應及破壞模式，進而選用合宜的抗震管材，才能在大型地震來襲時降低配水管線損壞機率，避免管網全面癱瘓，以期縮短復水時程，滿足「小震無損，大震少壞、復原迅速」之需求。

於由地下管線具有土壤-管材互制(Soil-pipe interaction)的特殊力學行為，因此地震對管線產生的反應及破壞模式很不一樣，有別於裸露明管可以橫向自由擺動，文獻指出，因為土壤的束制效應，地下管線受震時以軸向應力為主要控制因素，亦即軸向拔出、脫離的破壞模式居多，由於鑄鐵管的弱點在接頭，為了防止脫接，位處於地震帶的先進國家，陸續開發耐震防

脫接頭。而橫向剪斷、撓曲變形或折斷損壞僅占少數，通常在斷層大量錯位、破裂面橫過管線才發生，因為防護工事昂貴，除非是橫越斷層的重要幹管才有必要防護。

2.5.1 地下管線的地震反應及破壞

地震的損壞機制：透過過去地震的歷史經驗，地下管線地破壞主要來自於「地面運動」及「地面變形」兩個主要因素，造成的損害與範圍規模均有不同，地面運動的損壞比較全面性，為整個地盤與管線一起搖晃，但變形量較小，也較能夠透過管材及接頭的科技予以防範。地面變形的損壞比較局部性，通常伴為局部斷層剪裂到地表、局部土壤液化導致的地盤變形、土崩地滑，發生位置也不確定，有時瞬間變形很大，任何防範措施幾乎不可能克服，管線只能被剪斷或拔開。

「**地面運動**」為地震波傳到地表附近，將土壤與管線握著一起搖晃所引起的地震現象。震央產生的地震波原本只有壓力波(P波)及剪力波(S波)，但震波傳到地表時，因為界面效應，會產生其他的表面波(Surface Wave)，並沿著地表擴散，詳圖2-63所示，表面波包含洛夫波(Love Wave)及雷利波(Rayleigh Wave)兩種。

所以除了P波及S波必然影響，由於維生管線埋設僅有數米深，正好是表面波亂竄的範圍，因此搖晃的行為很複雜，而且受到場址效應(Site Effects)的影響，某些地點會有震波放大的情形。但仍可簡化為兩種主要震動模式，詳圖2-64，為沿著管身的軸向變形、橫向撓曲。由於周圍土壤的束制，橫向撓曲的自由擺動性不足，對管材影響不大，但軸向變形有時卻會對管材產生致命的結果，包含接頭脫接抽出、管身挫曲擠壓，當地震震度大、地表加速度PGA很大，可能同時毀掉許多地下管線。

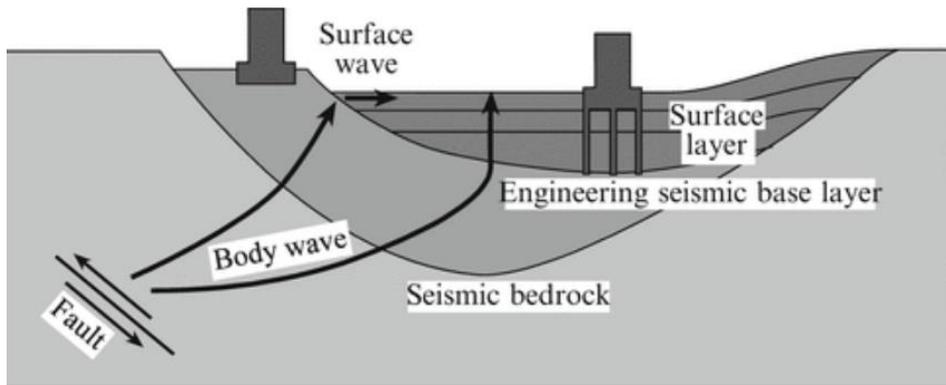


圖2-63 地震產生的震波與傳遞示意圖⁵⁹

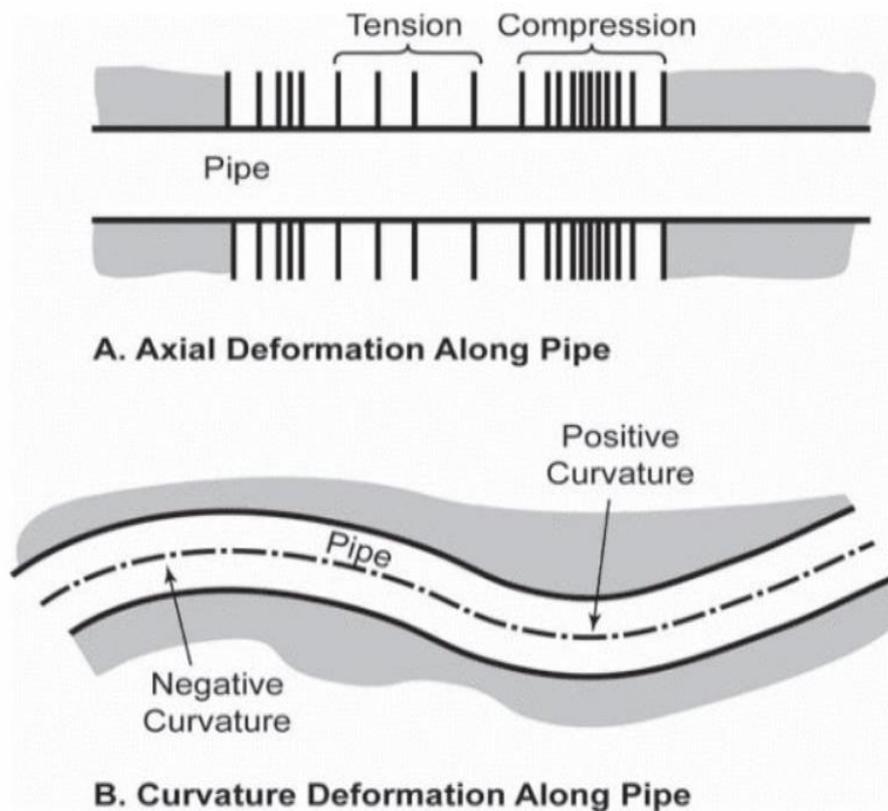


圖2-64 「地面運動」加諸於管線的震動模式，以軸向壓伸為主⁶⁰

因此目前世界上計算地震反應的擬靜態分析法，均基於軸向變形，例如ISO 16134(earthquake-and subsidence-resistant ductile iron pipelines)、中國GB、日本JIS，以及中華民國自來水協會編著的「自來水設施耐震設計指南及解說」均有類似的規範。

「地面變形」則為地震導致的山崩地滑或土壤液化的側潰，將橫過其

中之管線往一旁拖移，詳圖2-65，甚至是橫過斷層的管線，直接被斷層錯移也屬於此類。最早發展出來的分析方法是Newmark-Hall、Kennedy法，這兩類方法大約在1970年代提出，是簡化模型的解析方法，最大優點是可用手算，計算結果比較偏保守安全側。Newmark也是假設管線以軸向變形完全吸收斷層錯動，忽略管線的橫向變形及受力，Kennedy法則是改良自Newmark法，由於計算不複雜，在當時個人電腦不發達的年代，需透過電腦計算的有限元素法(Finite Element Method, FEM)難以大幅推廣使用，因此Newmark成為主流，1984年美國的Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline System，也建議採用Newmark-Hall法，並以Kennedy法進行驗算。

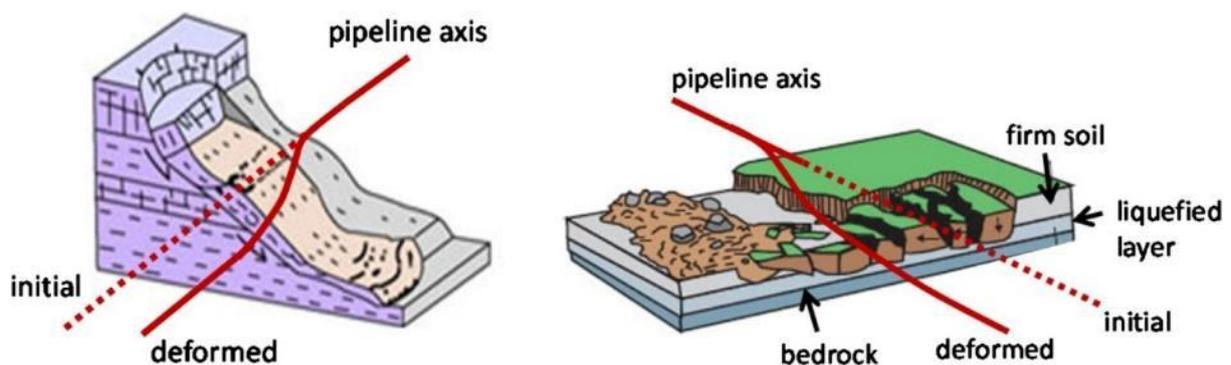


圖2-65 地震導致的「地面變形」對管線施加橫移力量⁶¹

如果錯動的部位只有整段管線的一小部分，例如滑動坡面、局部液化等等，此時並不能使用斷層上下盤整個錯開的Newmark-Hall公式。手算解析法必須改用1867年溫克爾(Winkler)提出的彈性地梁法，把地下管線當作是地梁，並在管線設置土壤彈簧，按照變形多寡，土壤彈簧就給予相對應的反力。或者採用有限元素FEM法，可模擬局部潰移、沉陷對管線帶來的應力與形成的變形。以現今常見的FEM套裝軟體如Ansys、Abaqus的計算結果，發現管段內部應力的發展仍以軸向應力為主，也就是破壞型態多以管線接頭拔開、脫接為主。除非瞬間側移量過大，才會於滑移交界處變成剪

斷破壞控制。

場址效應：管線埋設地點直接感受到的地震強度(Intensity)，例如PGA大小，以及震波頻譜(Spectrum)，例如震波低頻成分含量，深深影響現地搖晃程度以及破壞模式。然而這些地震重要特徵，都可能被現場地質條件所改變，甚至放大震動搖晃的程度、改變頻率成分，此即為「場址效應」。地震學家分析歷史上災損嚴重的大地震，許多都肇因於場址效應，甚至震央的震度並不高，但場址效應卻放大了災情。地震學家與工程師們於1971美國聖費南多地震、1976中國唐山大地震、1995日本阪神大地震...等災後現場調查，均發現了軟弱地層的地下管道，即便震度較低，其受災狀況居然都比堅硬地層、高震度場址的管線更為嚴重，因此鬆軟含水的沉積土之場址效應最明顯。

最著名的場址效應發生在1985年的墨西哥，詳圖2-66，震央為距離墨西哥城約400公里的太平洋濱海區域Campos，地震規模8.0，深度20公里，當地最大地表加速度PGA也僅有150 gal，震度並不是很劇烈(臺灣921地震之最大PGA為日月潭測站的東西向加速度，高達989.2 gal，超過1g)，雖然震波沿路傳播逐漸衰減，到達Teacalco地區時，PGA已經衰減到無害的18 gal，然而墨西哥城遠古時期為湖泊，現今的地層為千年來湖泊沉積的軟弱土層，如同果凍一般，將震波的高頻濾除，但放大了低頻成分，再加上震波由堅硬底部岩盤傳入鬆軟土層，發生折射並聚焦在盆地表層，盆地中央的SCT測站，居然測出170 gal的PGA，場址效應讓消散的震波再次復活並放大8倍，而且搖晃時間拉長、以低頻大振幅搖動，與許多高樓的自然頻率一致，發生共振效應，摧毀建物，受災面積達到32平方公里，8000幢建築物受到破壞，7000多人死亡，1.1萬人受傷，約30萬人無家可歸。

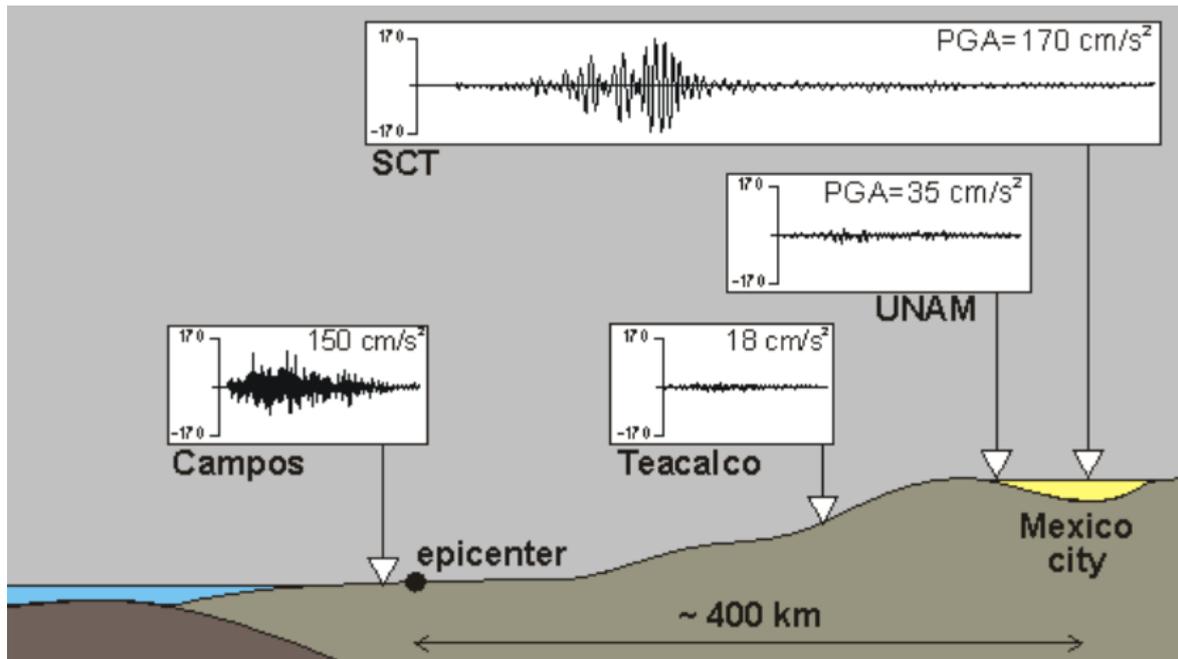


圖2-66 墨西哥1985年地震之場址效應導致的低頻放大⁶²

類似的場址效應在臺北也曾發生過，臺北盆地是湖積地形，具有很厚的軟弱沉積土壤，1986年花蓮外海發生規模6.8地震，深度15公里，震波傳到150公里的臺北盆地，發生了場址效應，軟弱土層放大了低頻振幅，讓北市裕台大樓傾斜、連續壁破裂，北縣中和的華陽市場倒塌，傷亡慘重。2002年331大地震也是震央在花蓮外海，規模6.8，深度13.8公里的中大型地震，同樣因為場址效應導致臺北市發生樓塌事件，興建中的101大樓更因為塔吊斷裂，工人墜樓死亡。

日本東京大學利用數值模擬，發現管線埋設於填方較厚的區域，在同樣的地震搖晃下，其地表加速度比堅硬地盤增加許多，也導致相同的管材在遭逢地震時，場址效應讓管線的命運有所不同，詳圖2-67所示，此區域曾經為丘陵地區，地勢高低起伏，之後配合都市計畫開發整地，將山頭削去，填平谷地，雖然整地後外觀一片平坦，但地盤堅實度相差很大。研究團隊以PGA約400 gal的強烈震度進行模擬，發現管線埋設於較厚的填方地(圖中灰黑色區域)，地震搖晃下的管身軸向變形明顯較大，最大甚至拉伸量可高

達0.350%，而削去山頭的區域，因底下為堅硬岩盤，同樣的地震搖晃下，配水管的軸向應變僅約0.002%，兩者相差約170倍，而且發生管線脫接損壞的位置，全部都落於填方地(圖中白色圓圈)，堅硬岩盤處的管線安然無恙。

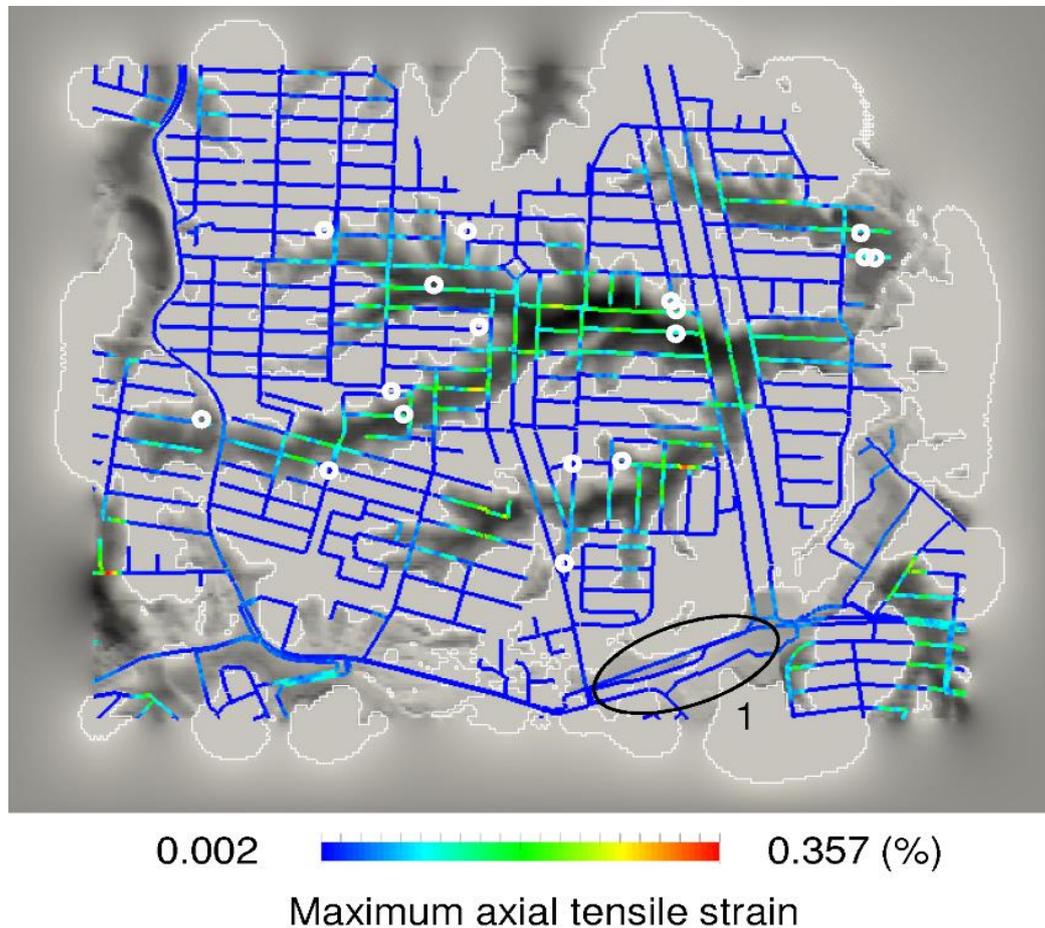


圖2-67 軟弱土層在地震時增加地下管線軸向拉伸變形⁶³

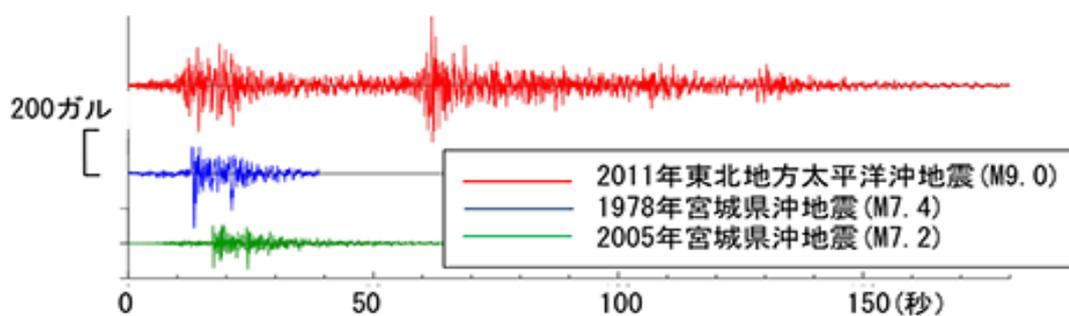
2.5.2 國內外地下管線震損分析

地下管線的主要損壞態樣統計：由前一節的分析可了解，地下管線因為土壤的束制，受振時管身運動轉為軸向變形為主，力量呈現擠壓或拉拔模式，由於接頭為管線銜接處，強度遠低於管身，屬於管網弱點，因此理論上地震發生時，接頭處的拔出脫離應屬管損的大宗。

搜尋文獻紀載之地下管線震損拔出破壞的比例，最高的為1976年中國唐山大地震，配水管脫接高達79%。1968年日本東北十勝沖地震，脫接比率

也達75%。然而近年地震帶國家陸續採用耐震管材，地下管線軸向脫接破壞比率明顯下降，1995年日本阪神地震，雖當時新的NS型接頭正在開發推廣階段使用不多，僅有部分管材汰換成S型耐震管材，但軸向脫接比率已降到61%；紐西蘭1987~2015之間數場地震的統計，各類管材脫接及挫曲等軸向破壞佔55%，雖然文獻沒提到接頭類型，可能也歸功部分耐震管材的使用；2016日本九州熊本地震，各類材質配水管脫接之軸向破壞佔48%，熊本市區內凡使用耐震管者，全部無損。2011年東日本大地震，使用耐震管材比例較高的城市，如仙台市水道局，管線脫接比率僅31%，千葉縣脫接率更是低至29%，但規模較小的水道，可能管道耐震化不足，既有鑄鐵管仍有許多CIP及DIP仍未更新為耐震接頭，明顯脫接比率較高，如登米市，脫接率仍高達58%，但已低於阪神大地震時的比率了。

仙台案例：仙台市為最靠近震央的大都市，震波傳到市區衰減小，不但振幅大且延時長，造成全市境內管線的損壞幾乎是全面性分布，詳圖2-68，厚生省的調查報告指出，仙台水道設施的損壞，不含場站、湖庫、水池等場內連接管線，光是地下管網配水管損害就超過437件，但即便強地動產生的土壤液化、邊坡滑動測潰，讓管線裸露出來，呈現懸空狀態，所有的耐震接頭均毫無損傷，沒有脫接現象發生。



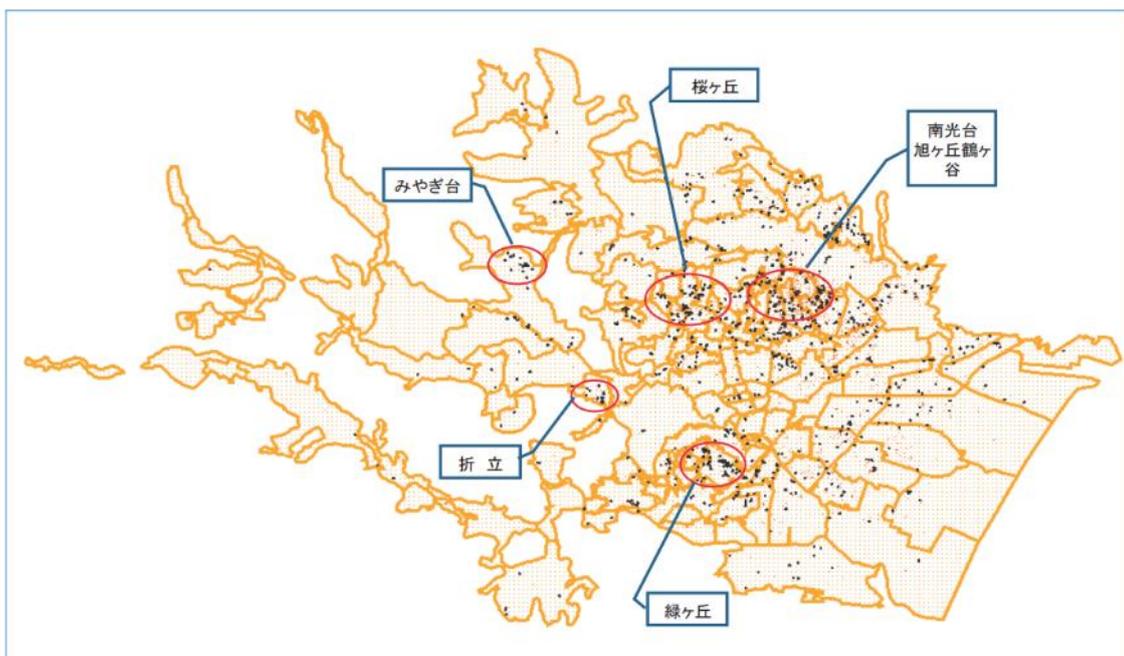


圖2-68 東日本大地震仙台市加速度紀錄及管損分布^{64、65}

熊本案例：九州2016年的熊本地震兩次震央都在東側近郊，詳圖2-69，地表斷層錯動位於東側人口較少的地帶，但大多管損分布卻落於西側沖積軟弱土層，代表管線震損大多屬於「地面運動」模式，即土壤抓著管線一起搖晃引起軸向變形的破壞，因此既有非耐震管材的脫接比率較高，僅有少數因液化及斷層錯動之「地面變形」導致的管損，地下管線(配水管)損壞件數合計共250件。但由統計數據顯示仍有48%的脫接比率，代表配水管耐震化不足，雖然DIP鑄鐵管的耐震接頭使用比率已經高達36%，但是管網系統內仍有CIP、PE、VP(塑膠管)等不具耐震防脫能力的管材，才導致管損率居高不下。

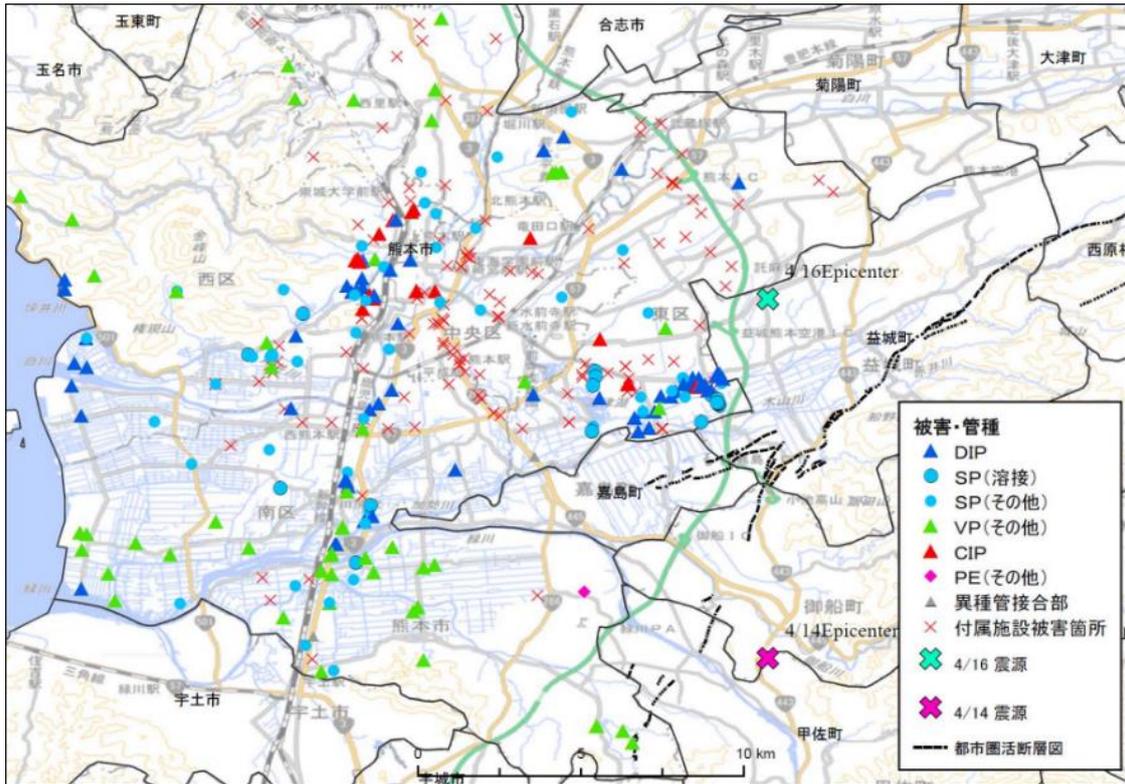


圖2-69 2016熊本地震各類管線損壞佈點及震央、斷層破裂面⁶⁶

神戶案例：1995阪神地震發生後，日本水道協會調查地下管道受害情況，並首次局部地區確認耐震管材抵禦強震的能耐，詳圖2-70所示，使用耐震接頭的DCIP(即DIP延性鑄鐵管)為完美的零漏水，而管損的最大宗則是傳統灰口鑄鐵，其漏水機率甚至為其他材質加總後的3.7倍，最值得注意的地方，則是當時的DCIP發生損壞居然99%都為A、K型接頭脫接所致，僅有1%為管身破損。阪神地震因為場址效應的加乘、及軟弱土層的低頻放大，導致軸向變形的拉脫損壞驚人，甚至發生軸向壓縮導致鑄鐵管接頭挫曲(Buckling)，插口末端硬擠入承口端並超過極限，雖然延性鑄鐵管沒有碎裂，但已經變形無法止水，詳圖2-71右圖。神戶市許多沖積平原、填海新生地...等處更發生大規模的土壤液化，當高地下水位飽和砂質土壤，受震波能量激發孔隙間的水壓(Pore Water Pressure)，破壞原本土壤顆粒穩定接觸堆疊態樣，促使土壤顆粒漂浮起來，當顆粒間的有效接觸應力為零，就如同一攤液態泥漿，毫無強度，配水管將隨機沉入或浮出地表，接頭脫離而柔腸寸

斷，等到地震停歇，超額孔隙水壓退散後，塵埃落定，土壤恢復強度，但整區域管網都已錯位，而且被土壤咬住定型，完全無法調整移動，詳圖2-71左圖，管網已遭大規模毀壞，只能拆除重作。因此日本加速新型耐震接頭的開發，適用於小口徑無押圈螺栓的NS型接頭，也在1996年左右研發問世，補齊各種口徑的耐震需求。

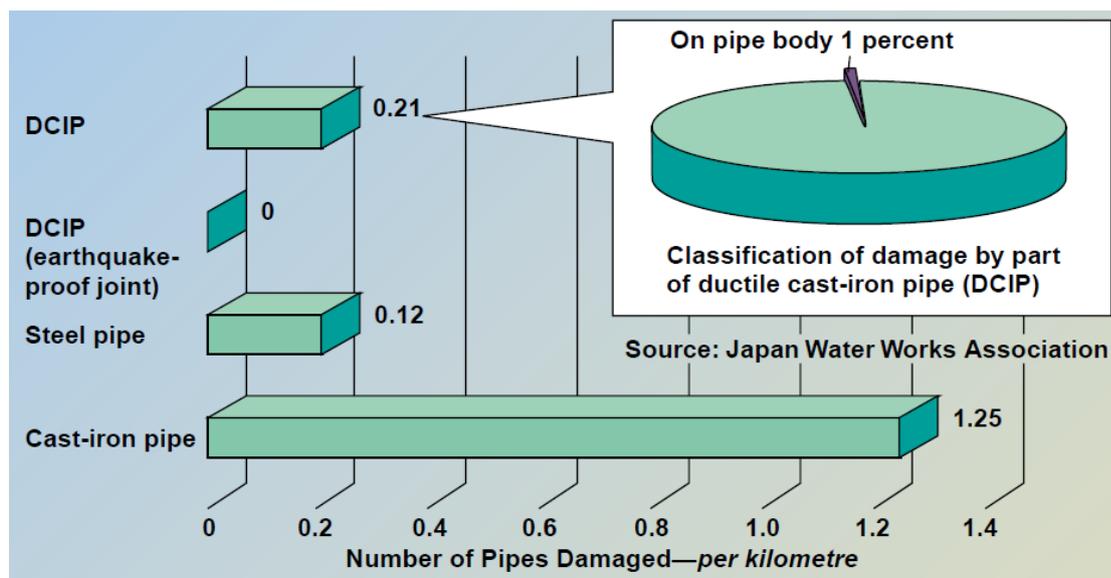


圖2-70 阪神地震管材每公里損壞件數⁶⁷



圖2-71 阪神大地震土壤液化管材浮起脫接、軸向壓縮損壞⁶⁸

1995年阪神大地震時期，全日本採用耐震管材比率僅18%，過了16年後發生東日本大地震時，全日本已經大規模採用耐震管材，包含早期S型、US

型，以及新式的NS型以及剛開發的GX型，整體比例接近80%，經過大地震的考驗，證實具有防止脫離的功能，甚至土壤已經完全側潰，裸露懸空，相鄰的其他地下管線斷裂全毀，耐震接頭仍然不發生脫接，詳圖2-72，讓全世界水道界都為之驚艷。



圖2-72 東日本大地震後地下管道只有耐震接頭無損(詳箭頭)⁶⁸

耐震接頭大幅縮短供水恢復時程：上述現場管線災害調查報告證明耐震管材的功效，但技術文件與報告書，普羅大眾很難了解，更無法體會實質效益，「供水恢復率」才最能實際反映耐震管材的表現，而且是廣大民眾直接感受的指標。1995年阪神大地震供水恢復率達80%約需25天，然而2011東日本大地震供水恢復率達80%卻只要15天，震度更高，復水時間卻大幅減少10天，詳圖2-73、2-74所示。

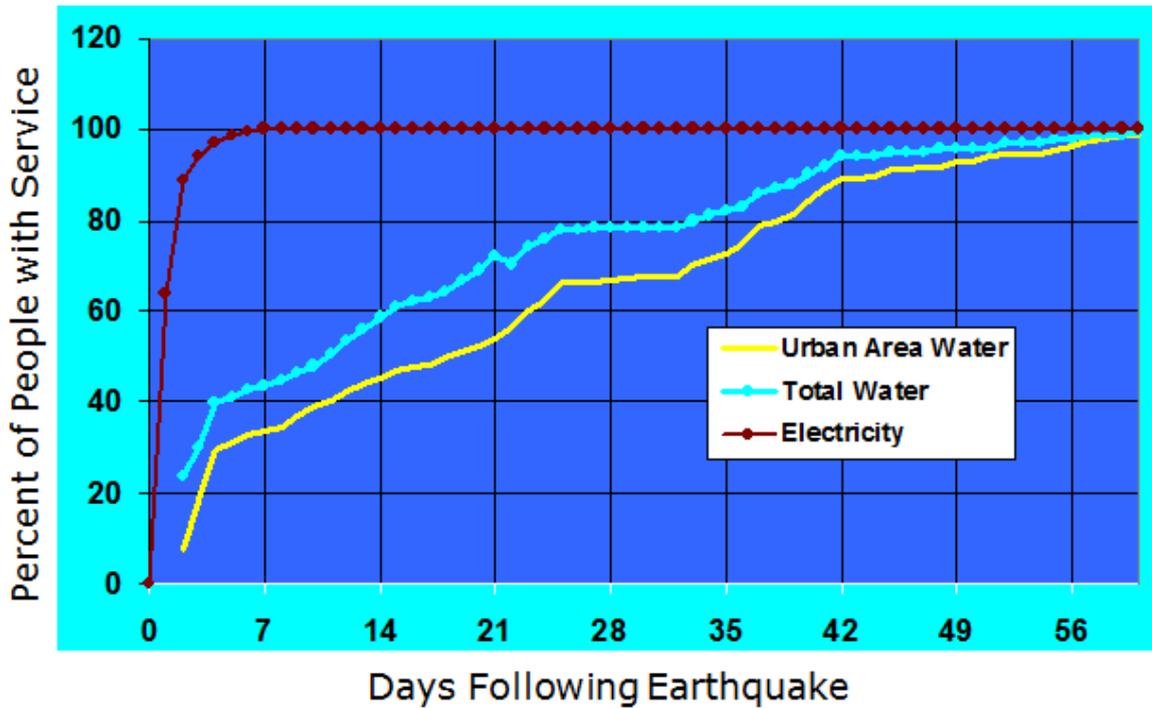


圖2-73 阪神大地震水、電復原推移圖⁶⁸

Situation of restoration for water supply damaged by the Great East Japan Earthquake

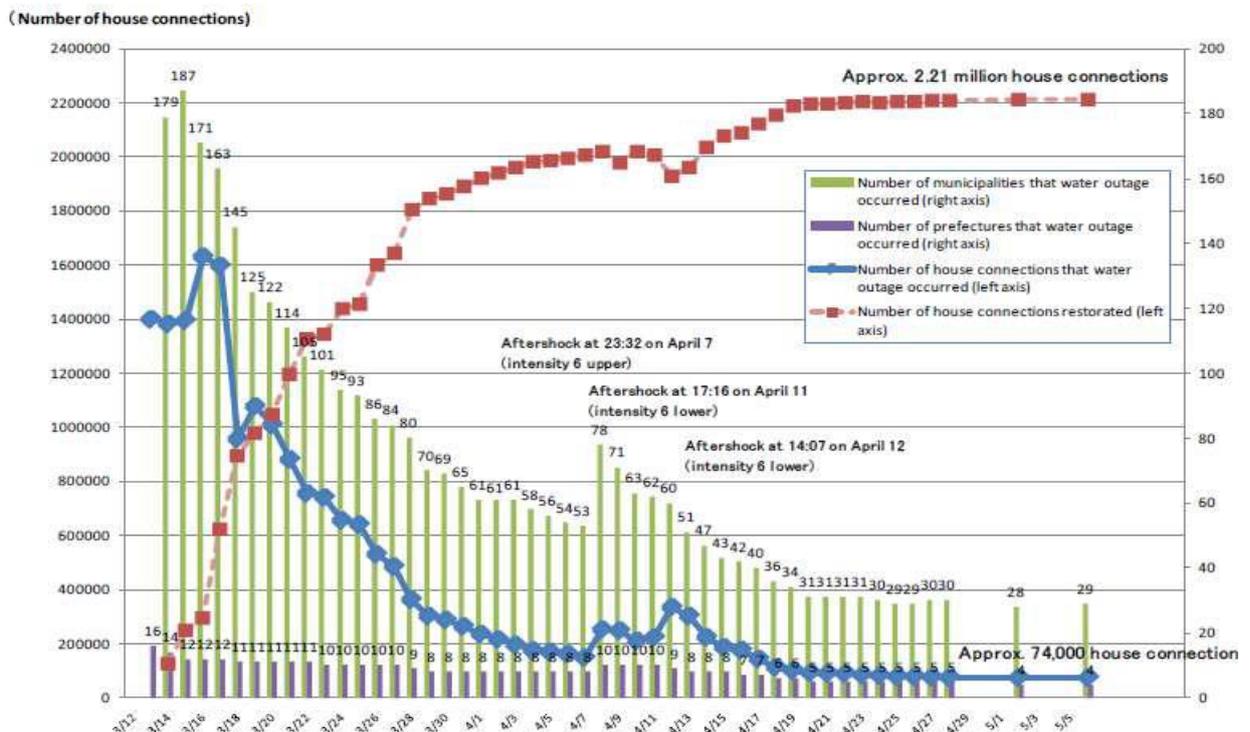


圖2-74 東日本大地震自來水系統復原推移圖⁶⁹

大型地震發生後自來水系統停擺，供水的恢復通常都由幹線與重要設

施場站修復先做，通水後才能於配水管網之中逐一找出漏水點，逐一修復，最後全面復水。如果管網中使用耐震管材，幹線搶通之後的逐一抓漏修復工作將可大量減少，迅速全面復水。圖2-73阪神地震的供水恢復曲線為平緩增長，代表修漏人員在幹線通水後，花了很多時間處理管網內小口徑配水線的脫接漏水。而圖2-74東日本地震，復原曲線比較陡，代表管網設置大量耐震接頭發揮防脫功效，幹管搶通後，不需冗長的漏水點修復，所以復水時程大幅縮短。

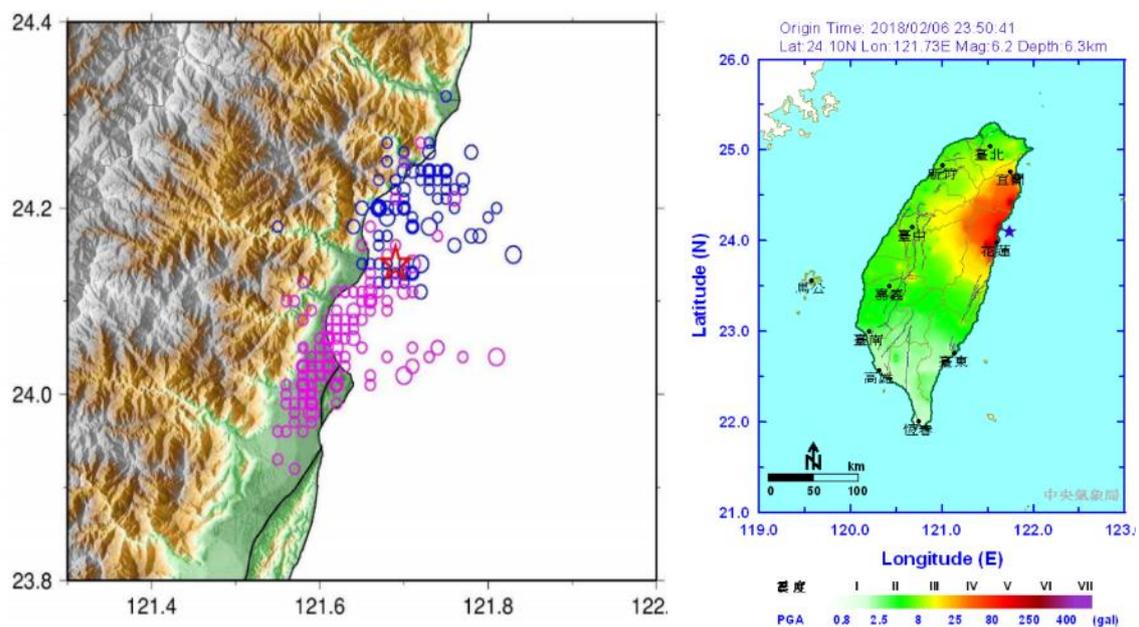


圖2-75 花蓮地震前震(藍色)、餘震(紅色)、震度(節錄自NARlabs)

2018年花蓮206地震：震央於花蓮東北方近海，規模6.2的花蓮地震，在花蓮市產生最大震度7級，有感前震及有感餘震共計247個，詳圖2-75。當主震發生時，花蓮市地震站曾測得最大地表加速度高達403gal，詳圖2-76左圖，而且反應譜有低頻放大的場址效應現象，南北方向震動在0.8秒的振動週期能量最強，詳圖2-76右圖，屬於長週期振動，甚至東西方向能量次強的震波成分，週期更長達2.5秒。雖然該地震站過去的地質調查，顯示地表下30公尺內之平均剪力波速 V_{s30} 高達515.64m/s，屬於堅硬土層，但實測震波的頻率域分析，卻是長週期振動模式(低頻放大)，肯定對地下管線造成嚴重的損

害。

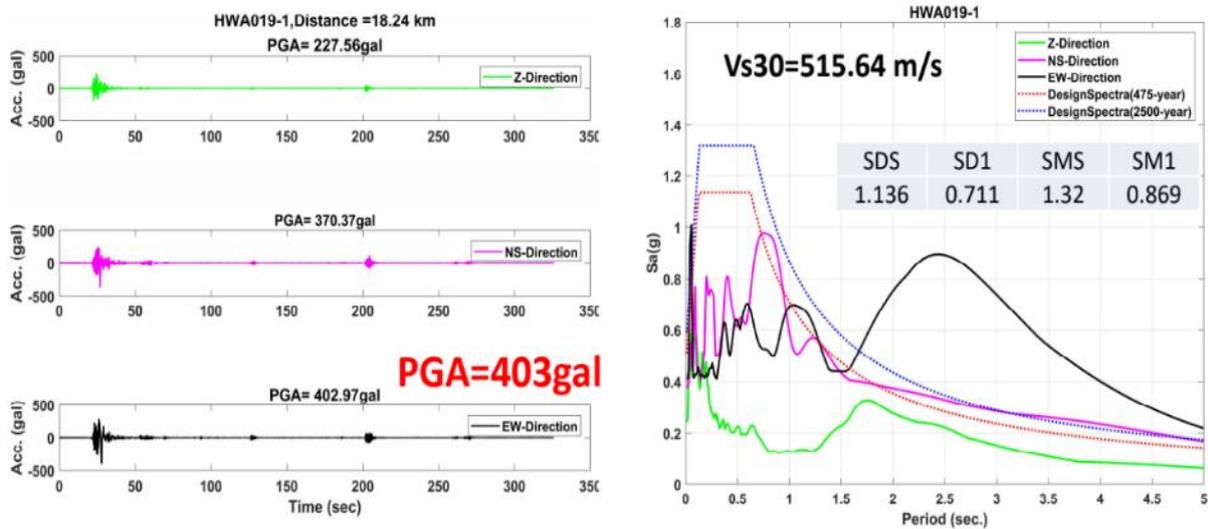


圖2-76 花蓮市地震站加速度及地動反應譜(節錄自NARlabs)

由ISO 16134、日本水道協會「水道設施耐震工法指針解說」，或中華民國自來水協會「自來水設施耐震設計指南及解說」的設計公式均可看出埋設於土壤中管線：地表振動速度、加速度愈大、地盤振動週期愈長、地層剪力波速愈慢，則軸向變形就愈大，脫接的可能性就愈高。花蓮測站的PGA大、地盤振動週期高，套用公式計算軸向變形接近0.9%，超過50mm，地下管線極可能大規模發生脫離漏水。

根據台灣自來水公司(以下簡稱台水公司)第九區管理處的統計，自2月6日地震發生，至3月1日止共修理1,147件大小漏水，初期停水約4萬戶，經8天的全力搶修於2月14日全面恢復供水。上千件的地下漏水多可歸因於土壤握裹著管線搖晃而脫離，為震波引起的「地面運動」所致。與國外的統計類似，雖然損壞件數很多，但漏水狀況尚可控制，即便沒有修復完畢，仍可全面供水，只是背景漏水量將會增加，要花很久的時間抓漏才能降低到以前的水準。

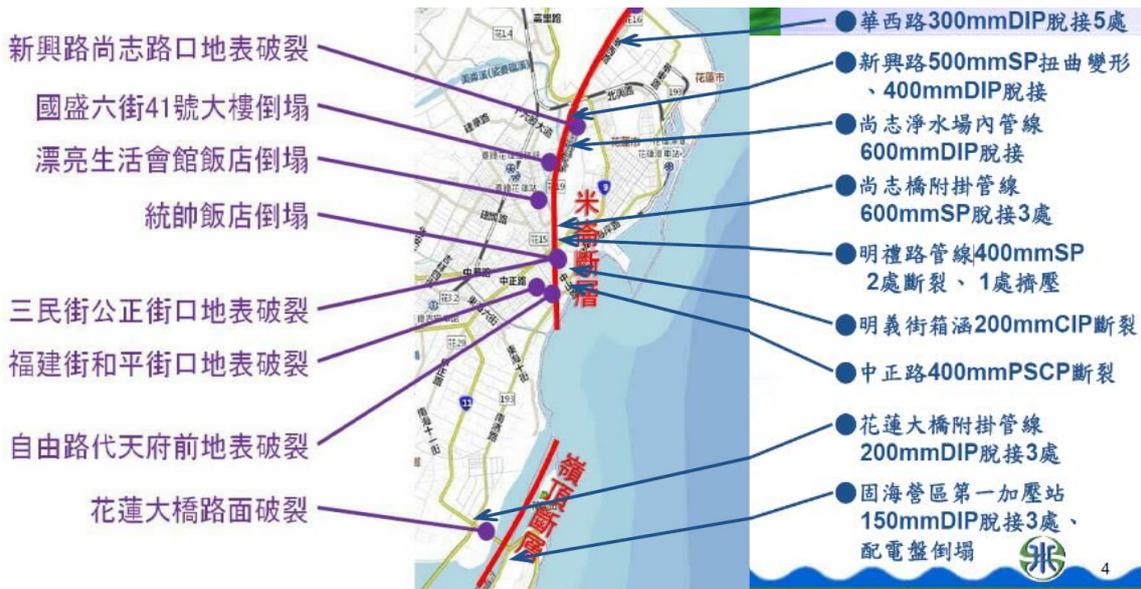


圖2-77 花蓮206地震主要配水幹線損壞位置圖(台水九區處提供)

花蓮地震引起米崙斷層「被動式」的錯動，地調所認為米崙斷層本次並未主動釋放能量，其錯動乃是因為主震引起的應力調整，導致斷層被動的錯開。過程產生嚴重的「地面變形」，沿著斷層帶的確觀察到地表破裂、錯移、甚至土壤液化。多棟房屋倒塌事件都在斷層破裂帶周邊，自來水幹線斷裂、設備毀損也集中在此線上，詳圖2-77。許多自來水幹線的毀損，均是橋樑附掛管線，因橋樑振動位移量過大而將管線剪斷，屬於自由端構件橫向擺動引起之彎矩、剪力型破壞，與地下握裹式的軸向拉伸、壓縮的破壞模式有所差別。但仍可觀察到土壤握裹的地下管線發生軸向變形破壞，例如新興路500mm鋼管的軸向擠壓，呈現嚴重塑性變形，擠壓點發生漏水，詳圖2-78上方兩圖，下方兩圖則是明禮路的400mm鋼管挫曲，管身材料直接被強大的軸向應力擠出一圈波狀環，直管長度縮短並發生漏水，最為經典。

由九區處系統配水量的變化趨勢(圖2-79)可看到地震發生之後，總配水量由原本平穩的8.7萬CMD，巨幅攀升到12.5萬CMD，增加約44%，雖然地震發生後的第8天，於2月14日系統主要幹線修妥並恢復供水，但配水量仍高達11.5萬，顯示管網中小口徑管線及給水管仍有許多漏水點，持續檢測修

理，到了2月28日配水量趨於穩定，但配水量仍有10萬噸，比地震前多了15%的背景漏水。

由花蓮的地震案例，再次證明耐震管線的重要性，由於地震規模、震度及地盤狀況沒辦法改變，自來水事業只能選擇更好的管材以為因應，幾處大型幹線及附掛橋樑管線可透過加裝伸縮管、可撓管等變位吸收管件，大幅降低損毀機率，其改善速度較快。各式管材參雜、分布廣大的地下管網，則必須使用具有伸縮功能的耐震接頭，並且搭配管線汰換逐年更新，並非一蹴可及之事，成本也很高。



圖2-78 花蓮206地震發生的配水幹管挫曲破壞(台水九區處提供)

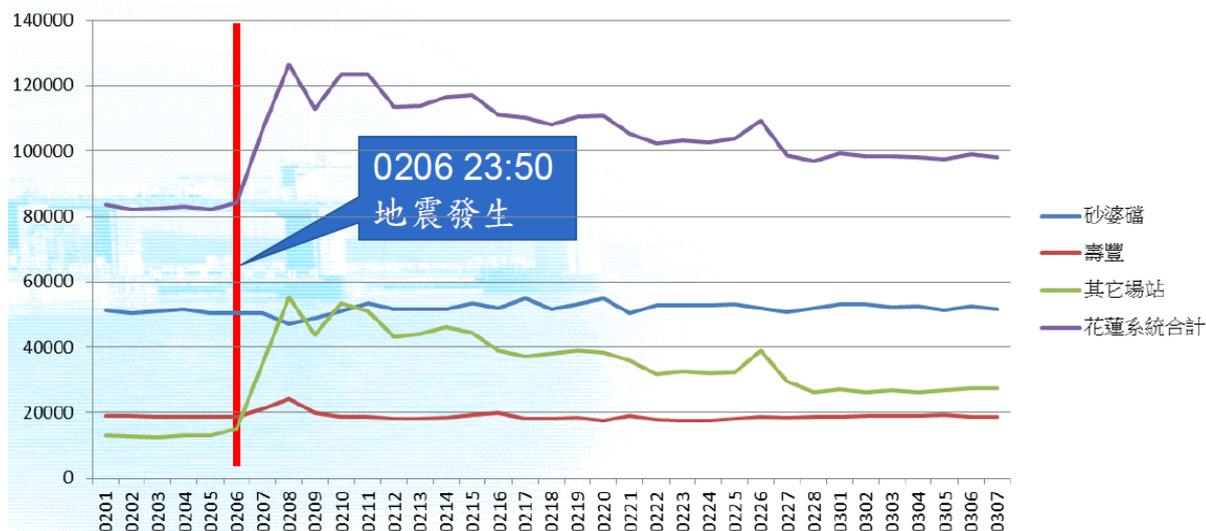


圖2-79 花蓮206地震漏水導致淨水場出水增加(台水九區處提供)

2014加州南納帕地震：2014年8月24日發生的規模6.0地震，造成West Napa斷層系統發生錯動，該斷層為右移斷層，最大的地面位移45公分。納帕市距離震央10公里，供水人口僅8.5萬人，地震造成嚴重的自來水管線破壞，供水系統復原費高達200萬美金。納帕市西側管網為1950~1960年代埋設，材質老舊脆弱，因此管線損壞大多集中於此區域，其中配水管脫接約有100個，佈點圖詳圖2-80。該址不但管線老舊缺乏耐震性，地盤更是軟弱，為河積土壤地，名為Brown Valley的社區管線材質幾乎全部是老舊的灰口鑄鐵，地震前納帕市每年修漏件數只有100件，地震後4個月內卻累積修理案件高達227件，係因軟弱地盤之場址效應放大了震幅，才導致管損嚴重。

而且Browns Valley更是斷層通過的地方，在地震當下即產生眾多地表破裂，許多管線就是被地面變形所扯斷，導致大量接頭脫接。然而，本次地震最奇特的現象為斷層的錯動並非一次性滑移，在地震後，附近的斷層帶一年內持續「潛變」(Creep)，即緩慢滑動卻不產生餘震，因此地震後一年內還陸續有107件接頭脫離的事件無聲無息突然發生，2015年繼續發生15件脫接。圖2-81所示，地震後發生潛變的Postseismic slip主要有兩段，雖然不直接通過納帕市，但因為應力調整，整個區域持續變形，甚至潛變量比

起地震當下的瞬間滑移量更大，詳圖2-82，地震當下，距離震央10公里的瞬間滑移量為45cm，但地震一年後距離震央6公里的CA Highway 12測站，所量到累積潛變滑移量，更接近50cm，因此導致部分管線陸續斷裂。本事件也讓納帕決定汰換管線時採用耐震接頭(Earthquake-Resistant DIP, ERDIP)。

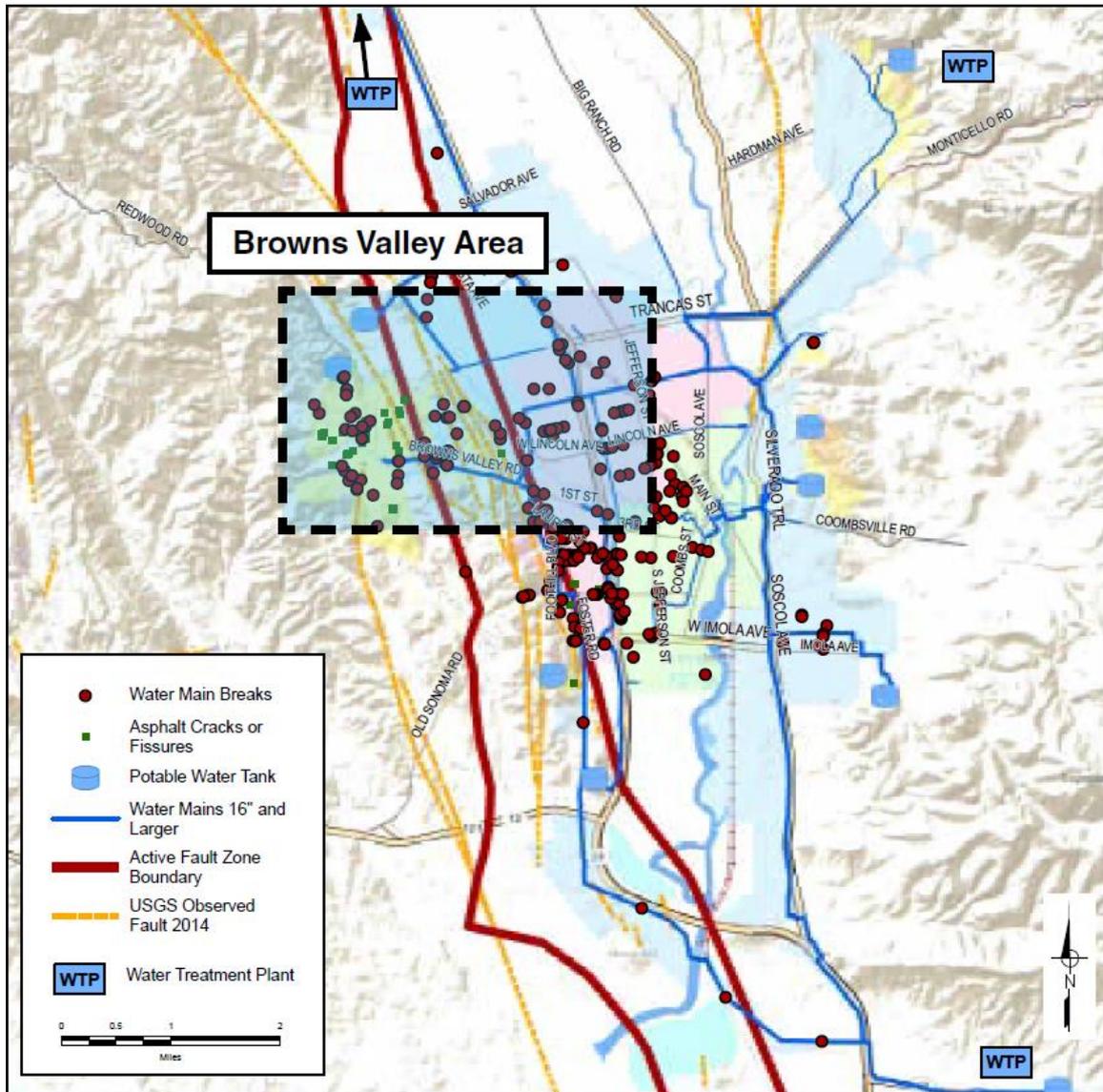


圖2-80 South Napa地震之配水管爆管及路面破裂佈點⁷⁰

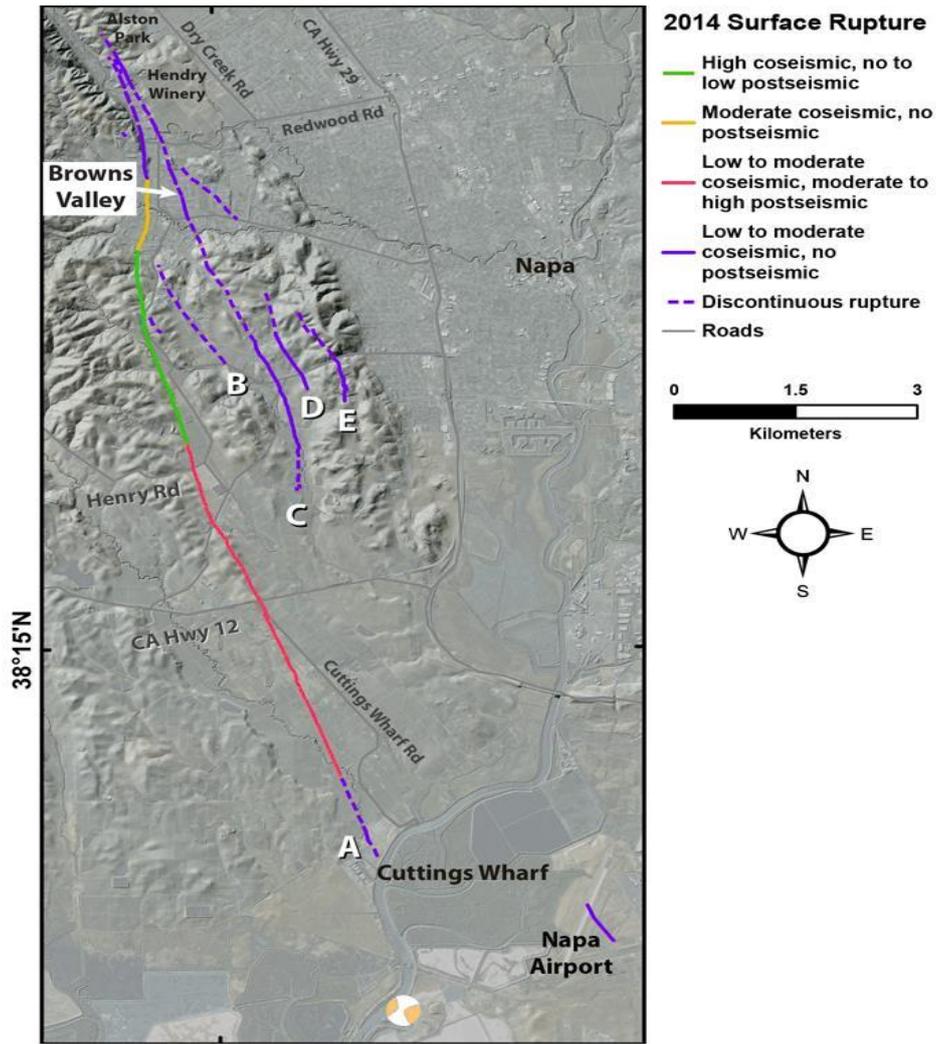


圖2-81 South Napa地震後部分斷層持續潛變滑動⁷¹

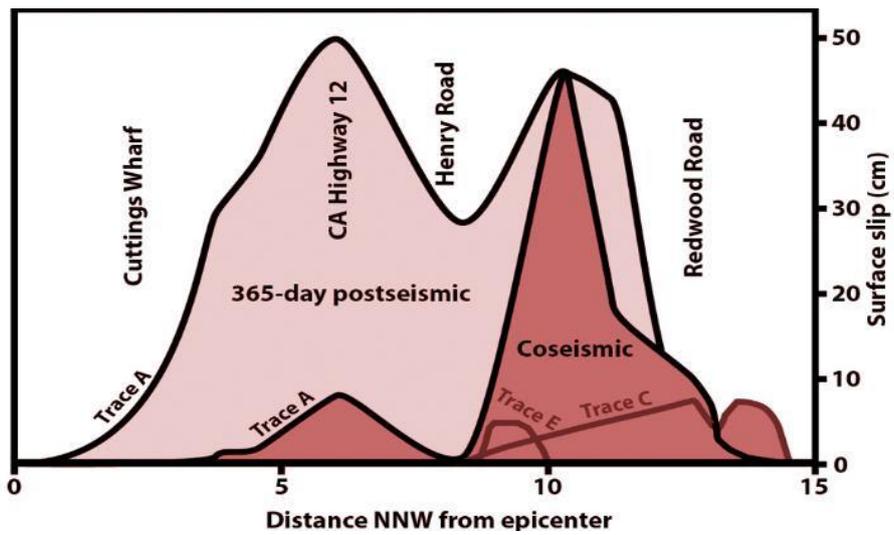


圖2-82 South Napa主震後的斷層潛變使地表持續變形⁷¹

2.5.3 國外耐震鑄鐵管接頭應用實績

洛杉磯採用日本耐震管：地震帶的國家，不但有使用耐震管材的需求，某些先進國家更為耐震管材開發的起源地區，以美國及日本的公司取得之專利權較多，產品也最多，其中又以日本的耐震管材發展歷史最久，技術領先全球，並已經陸續輸出到國外。

美國洛杉磯水電處(Los Angeles Department of Water and Power, LADWP)層經歷多次慘痛地震損害，最近一次為1994年規模6.7的北嶺地震(Northridge Earthquake)，造成5千人傷亡，災損金額超過200億美金，光是自來水系統修復就高達4,100萬美金。地震導致22%的表栓戶(約15.9萬栓)停水，6.7萬人受影響長達一週，14處原水管損壞、60處以上輸水管漏水、1,013處配水管脫接漏水，但用戶給水管僅約200處受損，分析管線災損後，發現配水管耐震能力低落，LADWP因此開始研議採用耐震管材，至2011年該公司之地震管材專家Craig Davis分析東日本大地震日本耐震管材的能耐，2012年高層批准一個1,000萬美金的試辦計畫，包含規範引進、教育訓練、日本技師指導、耐震材料進口、AWWA與JWWA管材銜接套件，選擇北嶺醫學中心附近的5處地點，於2014年破土埋入2公里的耐震管材，到2016年試辦結束總計鋪設6.2公里。洛杉磯所採用的ERDIP耐震管材正是日本久保田公司生產的NS、GX型接頭鑄鐵管(圖2-83)。

洛杉磯水電處的試辦案例具有指標性意義，由於美國也有類似的防脫型鑄鐵管接頭，但最後仍採用日本的舶來品，顯示日本耐震管技術經過規模9.0的超大地震驗證，已獲得國際認同。洛杉磯水電處為全美最大的市有水電機構(Municipal Utility)，成立於1902年，由洛杉磯市政府直接管轄，市長指派五位處長組成水電委員會(Board of Water and Power Commissioners)領導團隊，並受市議會監督，架構類似北水處。洛杉磯水電處服務人口高達410萬人，主要供水給西岸一線城市-洛杉磯，因此LADWP在美國當地具

有標竿及領導地位。

ORIGINAL PURCHASE ORDER
DEPARTMENT OF WATER AND POWER
 CITY OF LOS ANGELES
 P.O. BOX 51111, ROOM 1114, LOS ANGELES, CA 90051-0100

ITEM NO.	QTY / UOM	DESCRIPTION	UNIT PRICE
4	2 EACH	NAICS: 423840 MATL CODE: 9494990 EA PEQTY 2 SPIGOT & SOCKET REDUCER, JOINT = GENEX SIZE (MM) = 150 X 100	\$216.00 EACH
5	28 EACH	NAICS: 423840 MATL CODE: 9494990 EA PEQTY 28 BEND, JOINT = GENEX SIZE (MM) = 150 (DIA.) X 11 1/4 DEGREES	\$271.00 EACH
6	13 EACH	NAICS: 423840 MATL CODE: 9494990 EA PEQTY 13 DOUBLE SOCKET BEND, JOINT = GENEX SIZE (MM) = 150 (DIA.) X 45 DEGREES	\$411.00 EACH
7	7 EACH	NAICS: 423840 MATL CODE: 9494990 EA PEQTY 7 DOUBLE SOCKET BEND, JOINT = GENEX SIZE (MM) = 150 (DIA.) X 22 1/2 DEGREES	\$375.00 EACH
8	2 EACH	NAICS: 423840 MATL CODE: 9494990 EA PEQTY 2 SPIGOT PIPE WITH FLANGE, JOINT = GENEX SIZE (MM) = 150	\$164.00 EACH
9	4 EACH	NAICS: 423840 MATL CODE: 9494990 EA PEQTY 4 COLLAR, JOINT = GENEX SIZE (MM) = 150	\$445.00 EACH
10	2 EACH	NAICS: 423840 MATL CODE: 9494990 EA PEQTY 2 DOUBLE SOCKET SHORT PIPE, JOINT = GENEX SIZE (MM) = 150	\$354.00 EACH
11	6 EACH	NAICS: 423840 MATL CODE: 9494990 EA PEQTY 6 RESILIENT SEATED GATE VALVE, JOINT = GENEX SIZE (MM) = 150	\$894.00 EACH



圖2-83 洛杉磯水電處LADWP引進久保田GX、NS型耐震管材⁷¹

過去洛杉磯及全美各大城市一樣，均採用美國開發的Tyton Joint，又稱

為T型接頭，詳圖2-84左圖，為Push on型式，施工簡易、隨插即用，然而T型耐震性僅優於A型，與K型耐震等級相仿，稱為柔性接頭，抵擋中小型地震尚可，但發生大型地震時，災損率將大幅提升。

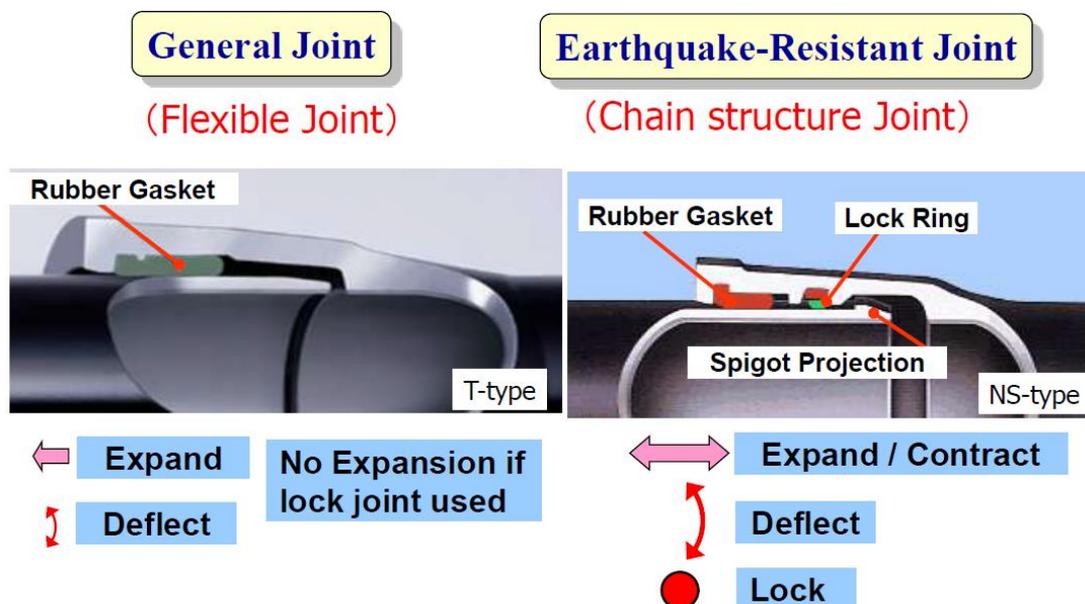


圖2-84 美國傳統柔性接頭與日本耐震接頭構造比較⁷¹

耐震接頭力學機制與常見產品：T型、K型接頭雖然可以轉動並允許軸向變形，能吸收地震變形之特性，然而當強地動震波搖晃或者地面破裂、液化導致過度軸向變形，T型及K型立刻脫開失能，甚至導致接頭一個接一個脫開，柔腸寸斷。日本耐震接頭則具有卡榫構造，當該接頭延伸到1%的極限，立刻鎖死，並由鄰近的接頭承受變形，稱為鎖鏈構造(Chain Structure)，而且鎖鏈中的每個接頭都能伸縮。

日本JWWA耐震管材規範完備，美國相對較不足，但AWWA管材標準有一種分類稱為低脆弱性(Low Vulnerability)管材，仍可見到耐震管的規格，詳表2-6，延性鑄鐵管C1xx系列須具備：承插接頭(bell and spigot, B&S)、膠圈(rubber gasket, RG)、拉伸限制(restrained, R)，許多製造商將T型或K型加上防脫裝置，分攤接頭承受的軸力，防止脫離。但美國U.S. PIPE公司的TR-XTREME接頭除了防脫，還具有伸縮功能，詳圖2-85所示，當管線承受

軸向變形時，拉開到一個位置，管身上銲接的「擋環」(Bead)將卡住防脫環片，形成鎖鏈機構。

表2-6 各類AWWA管材標準的脆弱性(Vulnerability)分類⁵⁶

Material Type/Diameter	AWWA Standard	Joint Type	Ruggedness	Bending	Joint Flexibility	Restraint	Total
Low vulnerability							
Ductile iron	C1xx Series	B&S, RG, R	5	5	54	4	18
Polyethylene	C906	Fused	4	5	5	5	19
Steel	C2xx Series	Arc-welded	5	5	4	5	19
Steel	None	Riveted	5	5	4	4	18
Steel	C2xx Series	B&S, RG, R	5	5	4	4	18
Low/moderate vulnerability							
Concrete cylinder	C300, C303	B&S, R	3	4	4	3	14
Ductile iron	C1xx Series	B&S, RG, UR	5	5	4	1	15
PVC	C900 C905	B&S, R	3	3	4	3	13
Steel	C2xx	B&S, RG, UR	5	5	4	1	15
Moderate vulnerability							
C4xx Series	Coupled		2	4	5	1	15
AC > 8-in. diameter							
Cast iron > 8-in. diameter	None	B&S, RG	2	4	4	1	11
PVC	C900, C905	B&S, UR	3	3	4	1	11
Concrete cylinder	C300, C303	B&S, UR	3	4	4	1	12
Moderate/high vulnerability							
AC ≤ 8-in. diameter	C4xx Series	Coupled	2	1	5	1	9
Cast iron ≤ 8-in. diameter	None	B&S, RG	2	1	4	1	8
Steel	None	Gas-welded	3	3	1	2	9
High vulnerability							
Cast iron	None	B&S, rigid	2	2	1	1	6

Source: Ballantyne, 1995

AC—asbestos-cement, B&S—bell and spigot, PVC—polyvinyl chloride, RG—rubber gasket, R—restrained, UR—unrestrained

該公司的直管甚至可客製化多道擋環，當現場不需要安放太長的直管，施工人員可於適當位置切斷管線，確保擋環距離管尾有足夠距離，詳圖2-85下圖，此時插入管頭便可形成另一個耐震防脫接頭。此款耐震接頭就是由Push on的Tyton接頭(T-型)改良而來的，管徑6~16英吋(150~400mm)可撓角均約4度，拉伸及壓縮量均為±1.45英吋(±3.68cm)，雖官網型錄未記載接頭抗拉力，但康乃爾大學的C. Pariya-Ekkasut等人於2016年曾測試300mm之抗拉強度，介於977~1150 kN之間，強度很高，代表該公司銲接的擋環及現場安裝的防脫環片，能夠有效形成鎖鏈結構，將變形交由相鄰接頭承受，避免拔出。同樣位於環太平洋地震帶的奧勒岡州尤金市(Eugene)便採購該公

司的TR-XTREME耐震管，於老舊管線汰換時使用。

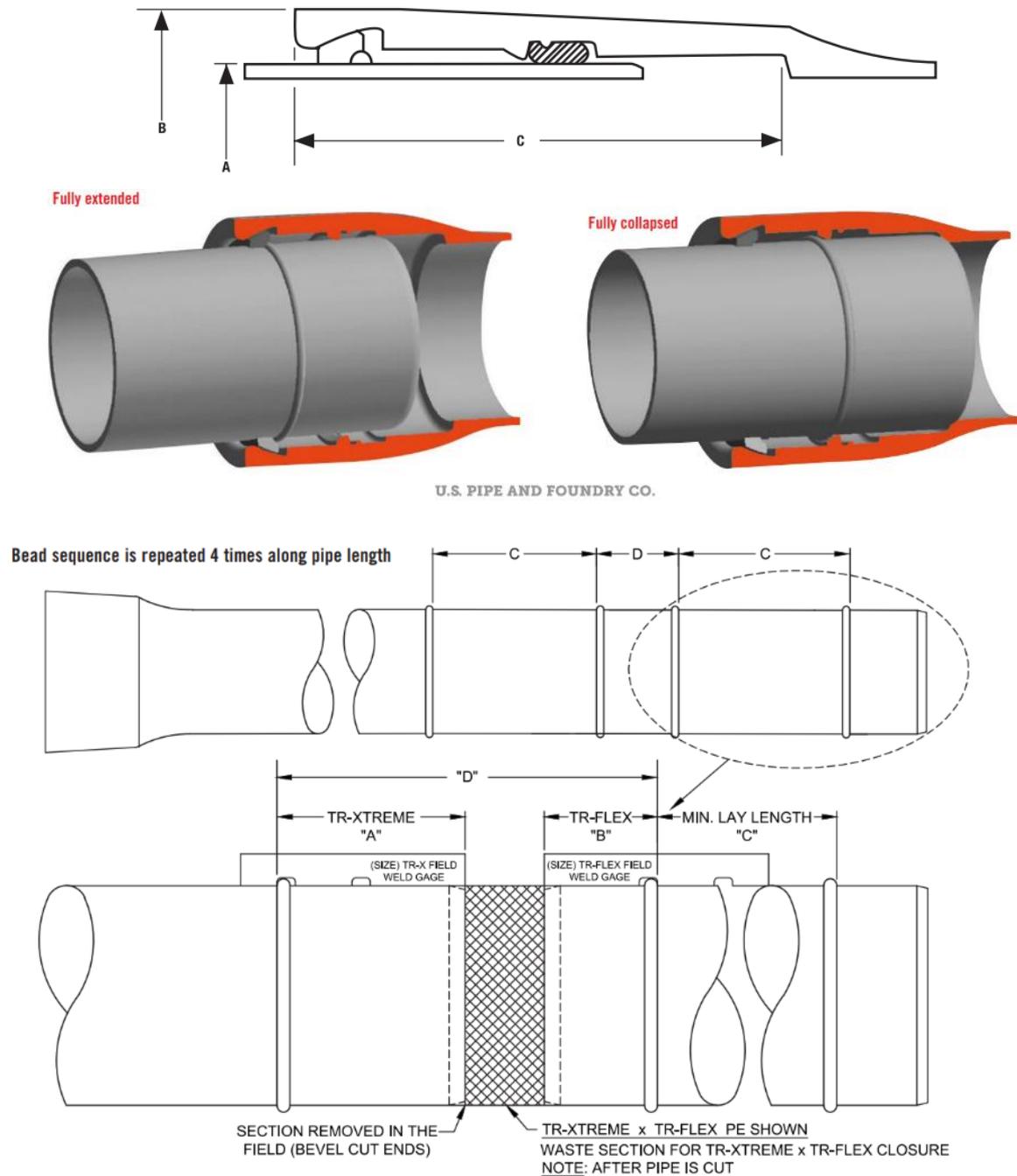


圖2-85 美國U.S. PIPE生產的耐震接頭TR XEREME(U.S. Pipe網站)

除了耐震鑄鐵管之外，AWWA也定義了其他材質的規範，其中低脆弱性(Low Vulnerability)的Polyethylene (PE)管，只是用熱熔接(Fused)銜接兩個管段(圖2-86 上圖及右下圖)，只能防脫，不具耐震性。中低脆弱性(Low/moderate Vulnerability)的PVC管則是兩側加上防脫拉桿(圖2-86下左

圖)，由於AWWA定義為防脫(Restrained)接頭，故伸縮能力很小，吸收強震帶來的軸向變形極為有限，主要功能為防止脫接。



奧勒岡州埋設的耐震管，管尾銲接的擋環(U.S. Pipe網站)

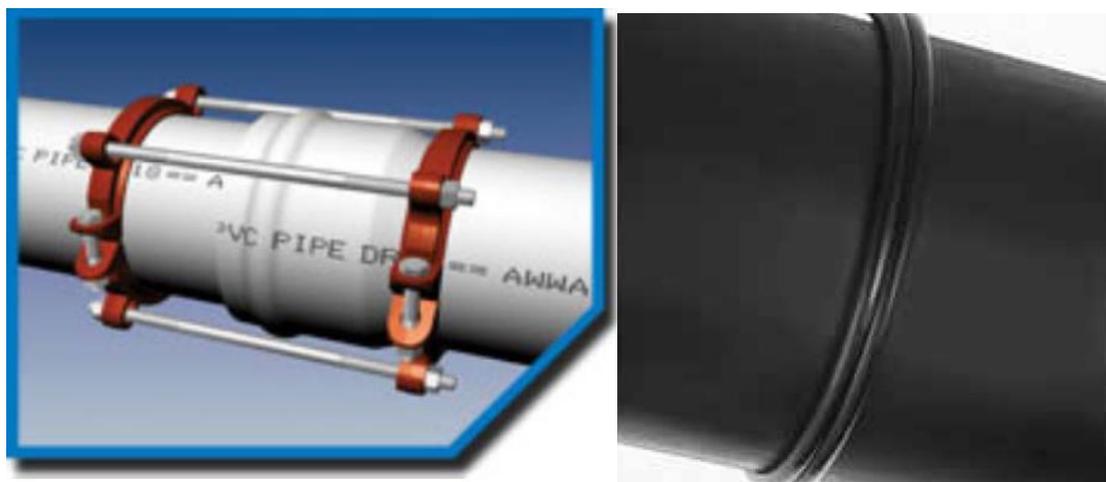


圖2-86 美國AWWA管材標準中脆弱性較低的兩類防脫接頭⁵⁶

除了U.S. PIPE公司生產改良自T型的防脫耐震管之外，國際還有其他鑄鐵管公司生產防脫型耐震管，例如美國American Pipe公司的MJ Coupled Joint系列，管徑由4~48英吋(100~1200mm)均有提供，為A型接頭的改良版，其防脫概念如同U.S. PIPE於管尾外管壁面銲接一道擋環，當管子抽出到一個程度時，擋環將卡到第二層押圈，達成防脫功能，詳圖2-87上圖所示。但

MJ系列的拉伸長度很小，可撓角也不足，因為該公司只是要生產「防脫」接頭以符合AWWA的Restrained規範，碰巧設計出稍微具有拉伸與連鎖功能的耐震型接頭。臺灣興南鑄造公司也於2012年開發出K-Bar耐震防脫接頭，詳圖2-87下圖，係改良自K型接頭，與American Pipe公司的MJ系列極為相似，都是雙押圈結構，於管尾銲接擋環，但由於K-Bar係繼承K型接頭的特性，並額外加上了防脫機構，因此功能上應該優於改良自A型接頭的American Pipe之MJ系列。

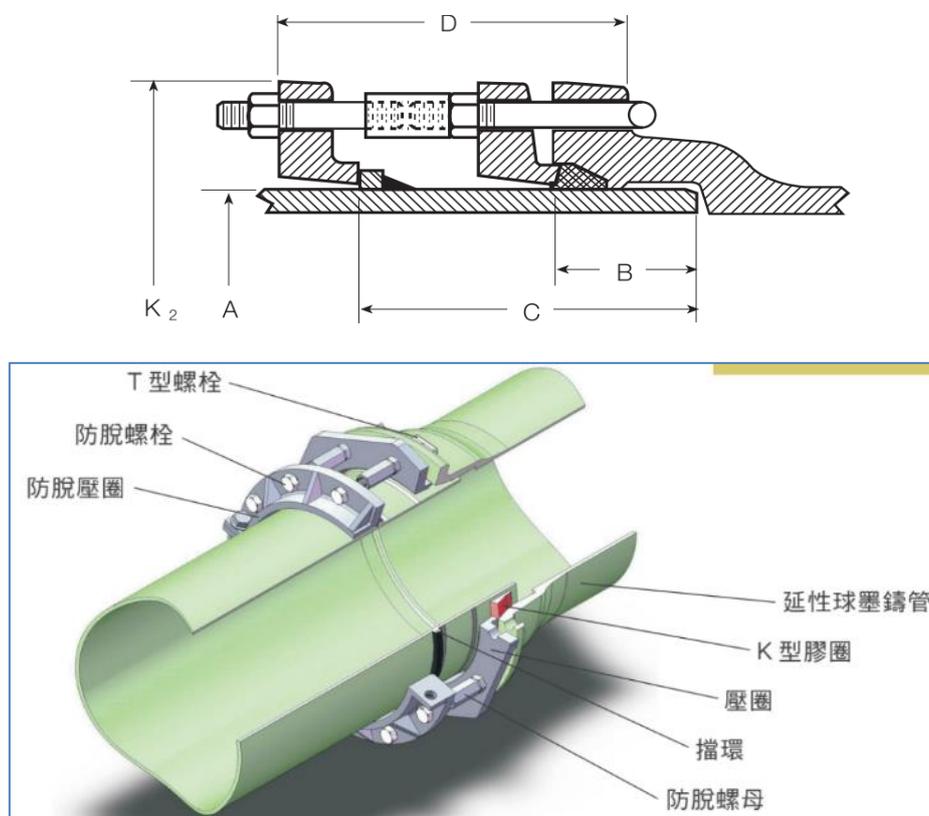


圖2-87 American Pipe (上)及臺灣興南(下)的K-Bar防脫接頭

2013年曾經由北水處工程總隊於高液化潛能區之二重疏洪道試辦埋設K-Bar管材，為國內首例自創耐震防脫管材施作案，此外興南公司也開發T型管的耐震加強型T-Bar，為T型管外側加上防脫拉桿，但須設定拉桿為鬆弛狀態(圖2-88左圖)，以利地震時吸收軸向變形。

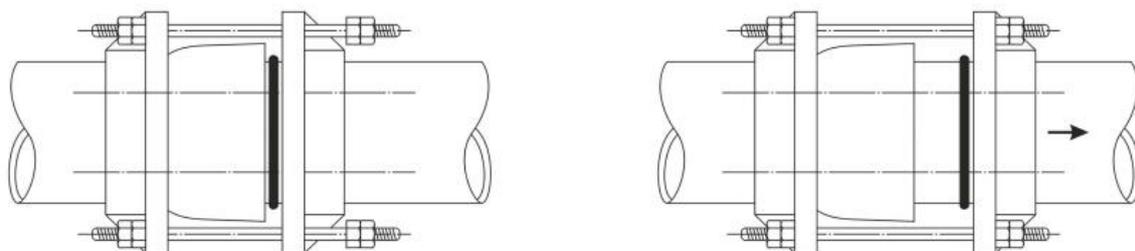


圖2-88 興南鑄造廠的T-Bar防脫接頭(公司官網)

表2-7 ISO 16134接頭耐震等級標準[ISO, 2006]

性能參數	等級	性能要求
伸長/壓縮率(e) $e=(\text{變形量}/L)\times 100\%$	S-1	$e \geq \pm 1\%$
	S-2	$\pm 0.5\% \leq e < \pm 1\%$
	S-3	$e \leq \pm 0.5\%$
防脫力(F)	A	$F \geq 3d \text{ kN}$
	B	$1.5d \text{ kN} \leq F < 3d \text{ kN}$
	C	$0.75d \text{ kN} \leq F < 1.5d \text{ kN}$
	D	$F < 0.75d \text{ kN}$
接頭最大轉角(θ)	M-1	$\theta \geq \pm 15^\circ$
	M-2	$\pm 7.5^\circ \leq \theta < \pm 15^\circ$
	M-3	$\theta < \pm 7.5^\circ$
L：管長(mm)；d：標稱直徑(mm)		

由於各家管材製造商的耐震管性能不一，為了衡量比較彼此優劣，並讓廠商設計製造耐震管件時有所依循，ISO於2006參考日本「地下埋設管路耐震接頭技術基準」，修訂了ISO 16134: Earthquake and Subsidence Resistant Design of Ductile Iron Pipelines的2006年版，將接頭耐震等級標準分為三項性能：伸縮率、防脫力、轉角(表2-7)。

由實驗室進行拉力、撓曲試驗，即可得知接頭等級分類，

其中日本的NS、GX耐震接頭，均屬於最優等級：

伸縮率：S-1級、防脫力：A級、轉角：M-2~M-3級。

U.S. PIPE公司的TR-XTREME耐震接頭則次之：

伸縮率：S-2級、防脫力：A級、轉角：M-3級。

臺灣興南鑄造廠的K-Bar接頭為初階款，但比K型接頭防脫力更高：

伸縮率：S-3級、防脫力：B級、轉角：M-3級

American Pipe的MJ Coupled Joint系列應等同初階款，但性能略遜：

伸縮率：S-3級、防脫力：未知、轉角：M-3級

東京採用耐震管材歷程：日本的耐震管材遠優於世界，係因日本經常發生地震，內需市場夠大，民間公司大量投入研發，一有新產品，各地水道局樂於採用試辦，以東京都水道局為例，約在1990年代中期即宣布全面採用(圖2-89)，而且是各口徑輸配水管均使用。

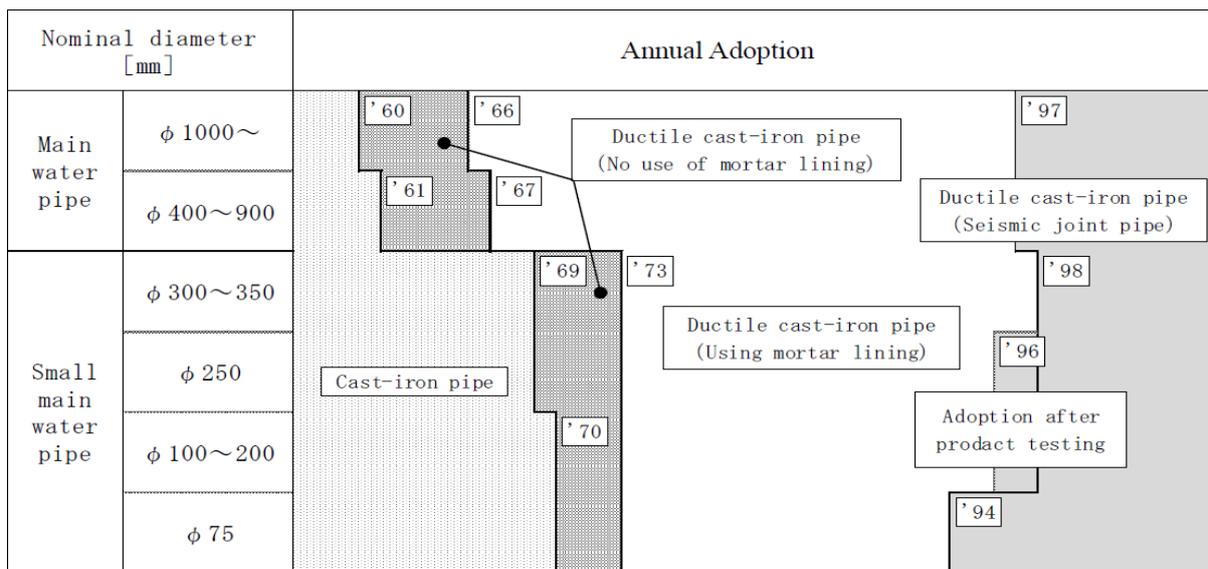


圖2-89 東京都水道局各口徑配水管採用耐震接頭的年份⁷²

然而日本在70年代開發第一代的耐震接頭，一開始各地水道局咸認為耐震接頭零件太多，不利現場安裝，僅少數試辦，到1990年僅5%的使用率，但幾次大地震的試驗，發現耐震管有其功效，之後快速增長，2000年已突破30%，2010年更達80%，成為耐震管王國。

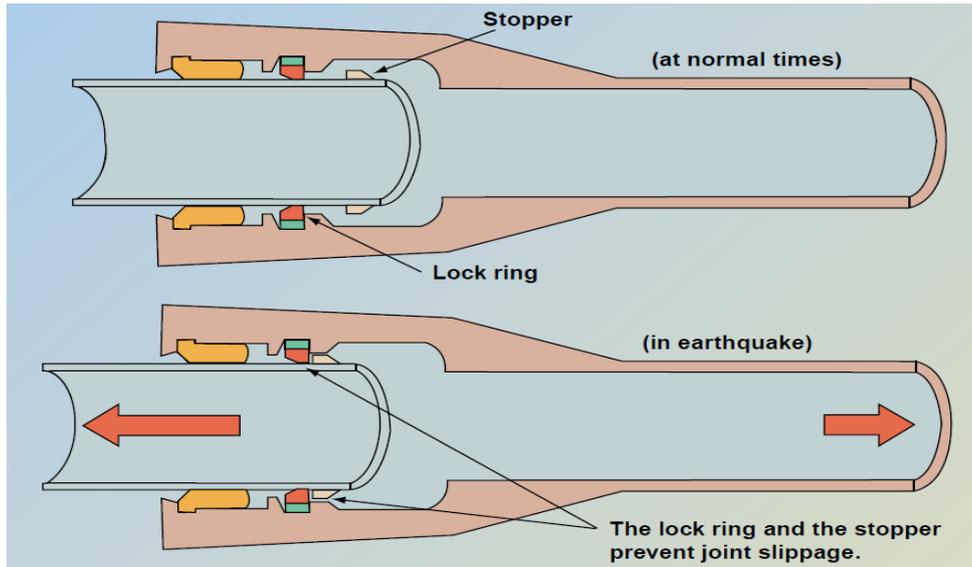


圖2-90 東京都90年代開始使用插入型的NS耐震接頭⁶⁷

	'60年代 (S35~)	'70年代 (S45~)	'80年代 (S55~)	'90年代 (H2~)	'00年代 (H12~)	'10年代 (H22~)
ブッシュオン継手	T形			NS形		GENEX
メカニカル継手	A形	KF形				NS形
	K形	S形	SII形			
	U形	UF形	US形			
	一般継手					耐震継手

圖2-91 日本各種継手(接頭)開始使用的年代⁷³

即便在東京都，水道局很樂意採用耐震接頭，但也不可能一夕之間把所有的管線挖出來替換，因此循序漸進的汰換策略是必要的。東京都將重要政府機關、防災系統、醫院、車站...等供水管線優先耐震化，確保災時指揮中樞能夠運作為初期耐震化施作方針，之後更打出K-Zero的汰換口號，規劃將所有輸配水管的K型接頭全部更換完畢。

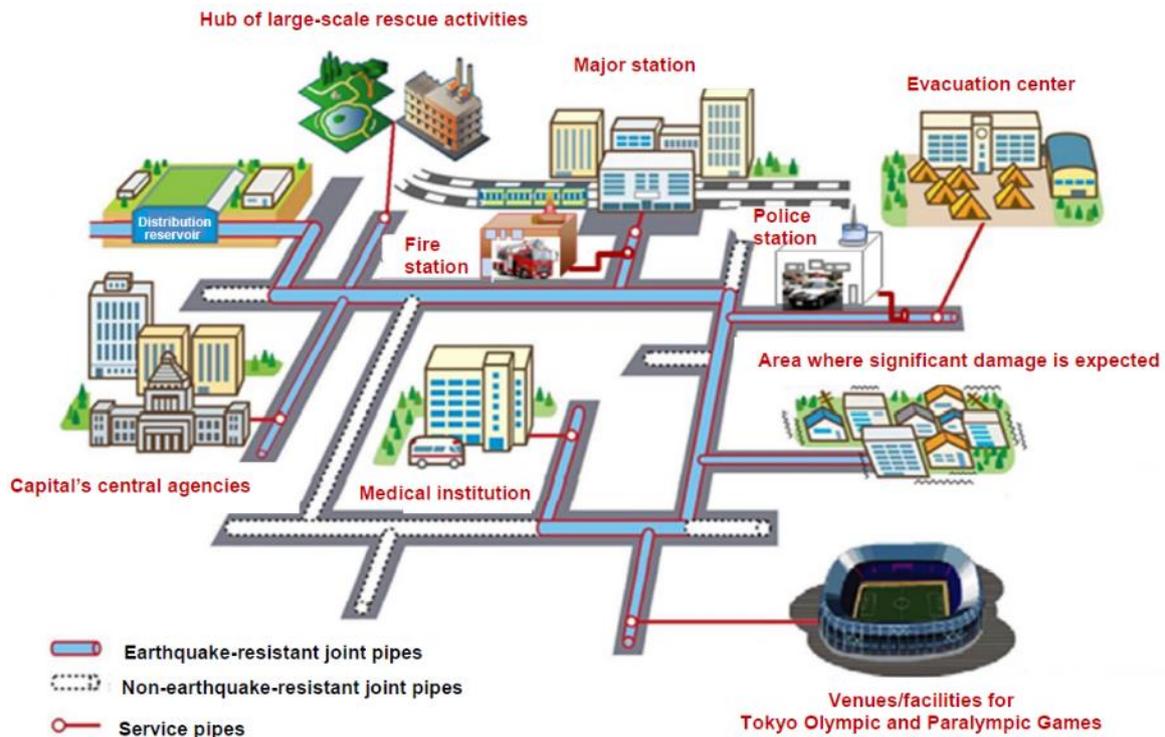


圖2-92 東京都水道局耐震管材的優先安裝位置⁷²

耐震管及可撓伸縮管聯合使用：即便日本的耐震管材性能優異，廣獲得國內外水公司青睞，商品及技術均已輸出，但遭遇幹管「橫越斷層」(Fault crossing)的單一大型錯動場合，許多設計人員發現只用耐震接頭是不夠的，因為斷層帶錯動可能發生極為不利的情境：位移量全部集中在單一錯動面。尤其是斷層上方的覆蓋土層厚度不足，堅硬基盤的剪裂將直接向上發展到地表，如同刀割般把管線扯斷，即便所有的耐震接頭完全發揮1%的伸縮量，仍不足以吸收斷層錯動總位移量，進而發生接頭脫接、或管身剪斷彎折等破壞。美國延性鑄鐵管研究協會(Ductile Iron Pipe Research Association, DIPRA)於2017年便建議此類單一大變形場合，可運用伸縮管、可撓管等大型變位吸收器(LDAPS)，並每隔一定間距設置，以彌補耐震接頭伸縮量之不足。

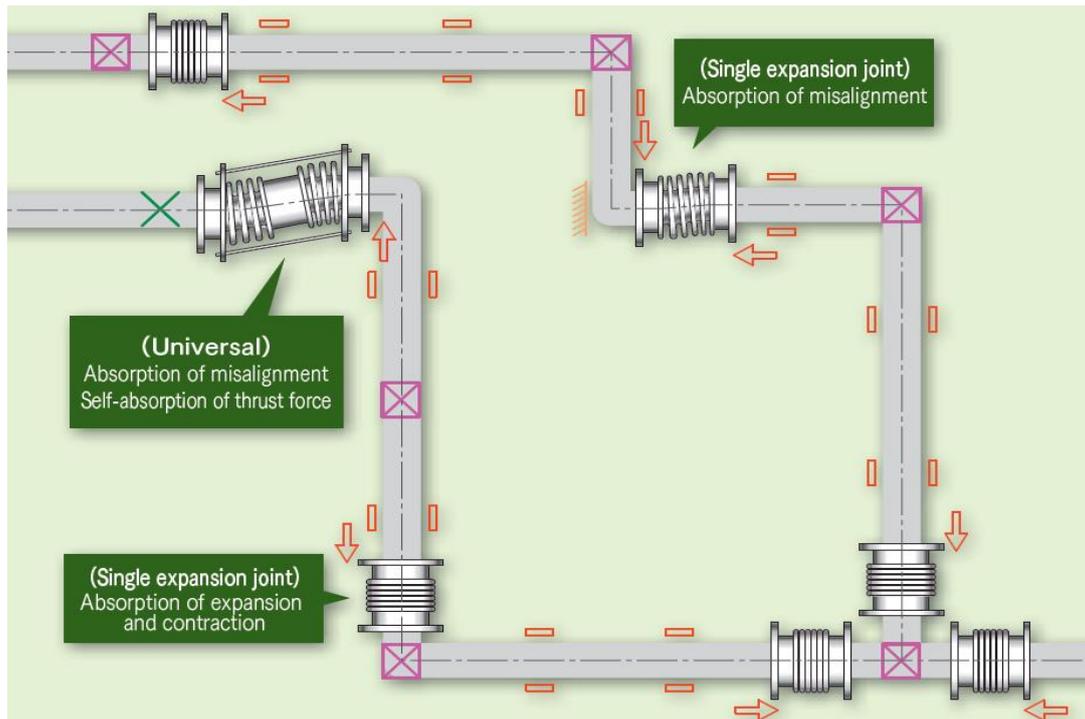


圖2-93 可撓管力學—直管段不變形，管件附近變形(ORK 官網)



圖2-94 於東日本大地震發揮功效的不鏽鋼伸縮管⁷⁴

可撓伸縮管的力學機制為「直管段不變形，管件附近變形」吸收自由端位移，如圖2-93，因此一般管線過橋梁都在明管附掛處，設置於接近橋台端(圖2-94)，以利可撓管吸收轉動、錯位及拉壓。而耐震接頭的力學機制為「直管段接頭變形，管件鎖住不變形」吸收地盤變位，因此NS、GX的管件全部都鎖死，呈現剛性部位，好讓直管的軸向伸縮功能順利發揮。因此結合這兩類管材，力學性能互補才能發揮最大變形吸收能力。DIPRA甚至推薦美國國內的兩個廠牌的伸縮管(American Pipe及McWane)，加上同樣美國

的耐震接頭(U.S. PIPE)，如圖2-95所示。認為ERDIP+LDAPS才是最佳解決方案。



圖2-95 美國延性鑄鐵管研究協會推薦伸縮管應搭配耐震管⁷⁵

1500mm幹線過斷層案例研究：日本鑄鐵管大廠久保田及金澤大學針對此類斷層錯移引致大變形的議題，以有限元素法(Finite Element Method, FEM)進行研究，瞭解1500mm DIP幹線利用US型耐震接頭(ERDIP)+伸縮可撓管(LDAPS)橫越大型斷層可能的變形機制。研究團隊分析，如果不使用伸縮可撓管，只靠US型耐震接頭，當斷層錯動3公尺就發生破壞了，不但耐震接頭轉角超過容許的4度，接頭拉力也超過3D kN的接頭強度極限值，代表接頭已拔開脫離。

若研究人員在管件數值模型加上伸縮可撓管之後(詳圖2-96)，每一只可撓管的伸縮量是耐震接頭的10倍，於斷層兩側各放一只之後再執行有限元素法程式，計算結果令人滿意，不但接頭轉角、拉力通通在容許值內，連管材本體撓曲的應力也遠低於容許值，代表接頭不會脫接、管身也不會撓曲斷裂，詳圖2-97上圖所示。

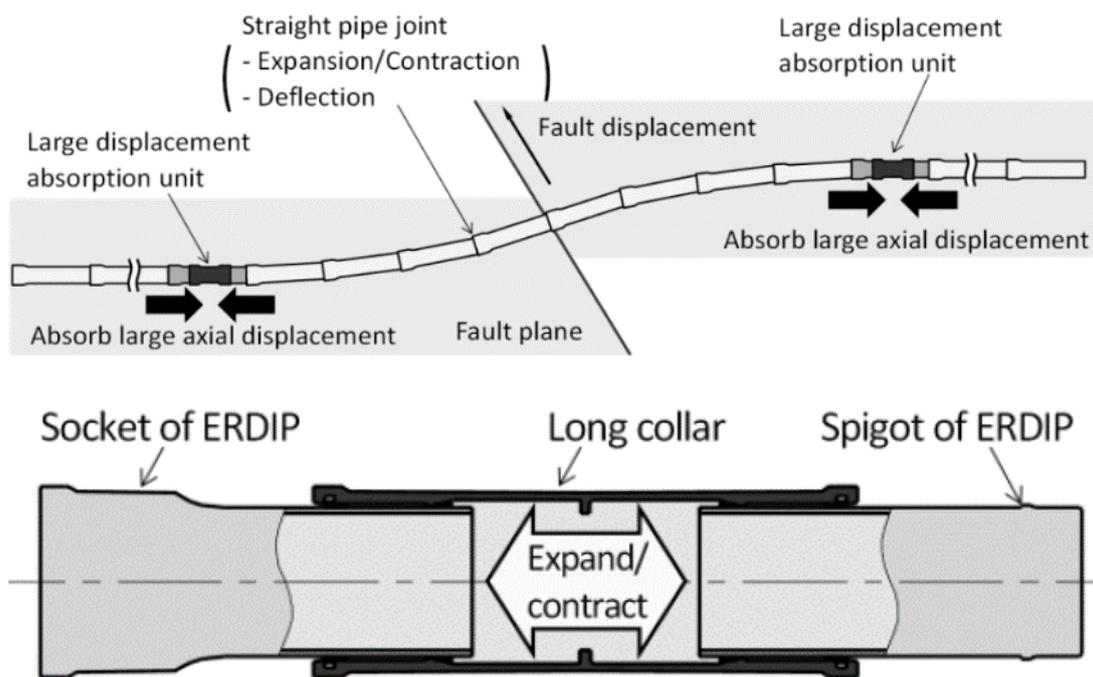


圖2-96 運用耐震接頭及伸縮可撓管橫越斷層⁷⁶

如果斷層錯開的位置不明確，研究團隊將伸縮可撓管每隔36公尺放一只，在可能剪裂的Zone外面兩側再多放一只，有限元素法分析結果同樣令人滿意，不管斷層錯動線在哪裡(詳圖2-97下圖)，結果都不發生破壞，而且管身應力及接頭變位差距不大。久保田與金澤大學的分析情境是將斷層「一刀兩斷」，並位移3公尺，屬於很嚴峻的情境，透過ERDIP+LDAPS聯合運用，的確可以克服超大剪裂帶的巨幅變形。

由於各家管材製造商的耐震管性能不一，為了衡量比較彼此優劣，並讓廠商設計製造耐震管件時有所依循，ISO於2006參考日本「地下埋設管路耐震接頭技術基準」，修訂了ISO 16134 : Earthquake and Subsidence Resistant Design of Ductile Iron Pipelines的2006年版，將接頭耐震等級標準分為三項性能：伸縮率、防脫力、轉角(表2-7)。

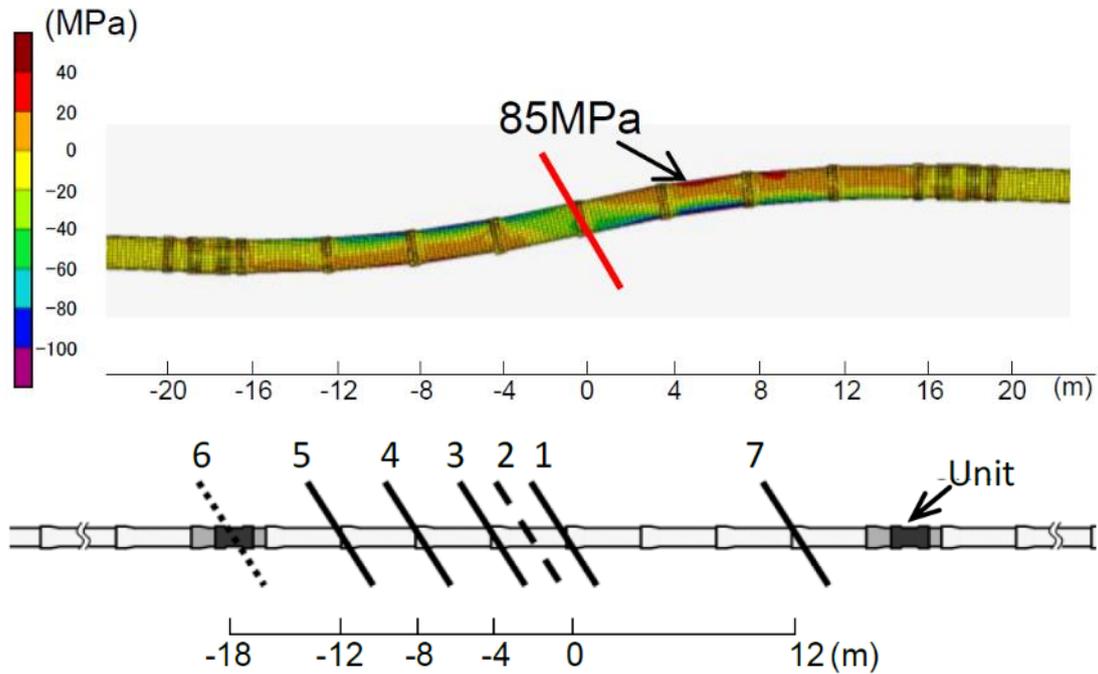


圖2-97 不論斷層錯動位置在哪，管身應力均在容許值內⁷⁶

2.6 小結

透過上述各章節的大量文獻資料回顧，經探討分析、比較國內管材使用狀況，本研究歸納出以下四點：

1. 金屬材質：經過鑄造商數十年的技術演進，北水處使用的球墨鑄鐵管DIP，材質原料、鑄造品質、熱處理均與國外相似，雖然規範僅要求球化率70%，但由金相觀察球化率遠大於此，FCD400~450鑄件之延展性、韌性、強度等力學行為很接近低碳鋼，能夠「以鐵代鋼」。

2. 管壁內襯：北水處使用的DIP內襯樣式較少，選擇性不足。600mm以下口徑的DIP，直管清一色使用水泥砂漿內襯，管件則全部使用粉體塗裝內襯。國外可視管線保護的需求搭配使用加密封塗層、液態塗層、粉體塗裝、水泥砂漿內襯，國內未來將訂定規範比照採購。

只要有內襯，鑄鐵管之摩擦阻力，新舊管差異不大，阻力皆很小。美國的研究顯示使用1~39年的水泥內襯C值介於125~151，中華自來水服務

社107年委託成大水工所「球狀石墨鑄鐵管摩擦阻力測試-水工模型試驗」⁹⁵，水泥內襯C值介於137.5~147.0、粉體內襯C值介於147.5~149.0。

3.內襯溶出與強度：北水處水泥內襯直管，於某些管末端流量很小的區域，偶而有「吐鹼」導致的pH超標問題；而粉體塗裝管件則經常有內襯剝落的問題，導致粉體碎塊四散、阻塞水表。本研究將透過大量試驗數據分析，研擬粉體內襯拉拔強度，據以訂定採購規範。

4.管線抗震：地下管線因為土壤束制，震波全部轉換成軸向拉壓的變形，配水管以脫接破壞為主，而北水處的盆地軟弱土層更會放大軸向脫接趨勢。台美日均有耐震接頭產品，但以日本歷經地震洗禮考驗，其產品外銷至台美，應用最廣，但仍需本土化生產才能推廣長久。

第三章 DIP管內襯塗裝對水質及防蝕探討

臺北配水管材之運用隨著技術與產品的推陳出新，百年來不停的引進、演化並與時俱進，但時至今日仍有提升改善的空間。本章將由北水處配水管材使用上的四個新興議題，包含水質、防蝕、耐震、施工，透過案例探討、試驗發現、實作經驗，歸納出目前配水管材不足之處，並提出改善建議，作為爾後最適管材之選用參考。

3.1 水泥內襯對水質影響

國內外文獻均指出水泥內襯對鑄鐵管提供了妥善的保護，不但價格平易近人，離心披覆砂漿的製造工法簡易，水泥的鹼性物質更是鑄鐵的最佳屏障，讓怕酸蝕的鑄鐵得以耐用四十年以上，然而新管的水泥砂漿遇水後極易溶出氫氧化鈣、鋁離子、重金屬...俗稱「吐鹼」，尤其是硬度低的自來水對水泥內襯具侵蝕性(Aggressive)，加速溶出鹼性物質進而改變水質，雖然於正常流量的管段，自來水不停稀釋下，析出濃度均可維持在飲用水標準，但是流速過慢的管段，新管埋設後TDS、pH超標可能歷時很長，甚至長達數年之久，輕者民眾投訴自來水滑膩，重則發生荷屬古拉索島洗腎病人傷亡事件。

本節以水泥內襯鑄鐵管泡水靜置試驗的結果求得吐鹼參數，並套用管網水理模型，模擬溶出物質擴散行為，並據以提出改善建議。

3.1.1 內襯溶出參數及管網水理模型

內襯溶出試驗：評價管網內襯溶出物質的濃度，必須結合管網水理模型，將水的流動也納入考量，才能完整剖析鹼性物質濃度於管網間的分布與擴散。但唯有是先透過靜置泡水試驗，才能求取內襯吐鹼的速率(反應係數K)，以及吐鹼平衡量(飽和濃度 C_L)，這兩項重要參數將控制水理模型內襯

吐鹼的快慢多寡。於美國環保署水理程式EPANET對管線元素輸入這兩個參數，該管段就如同一個鹼性物質釋放器，於多時段(Extend Period)分析下，源源不絕吐鹼到水中。

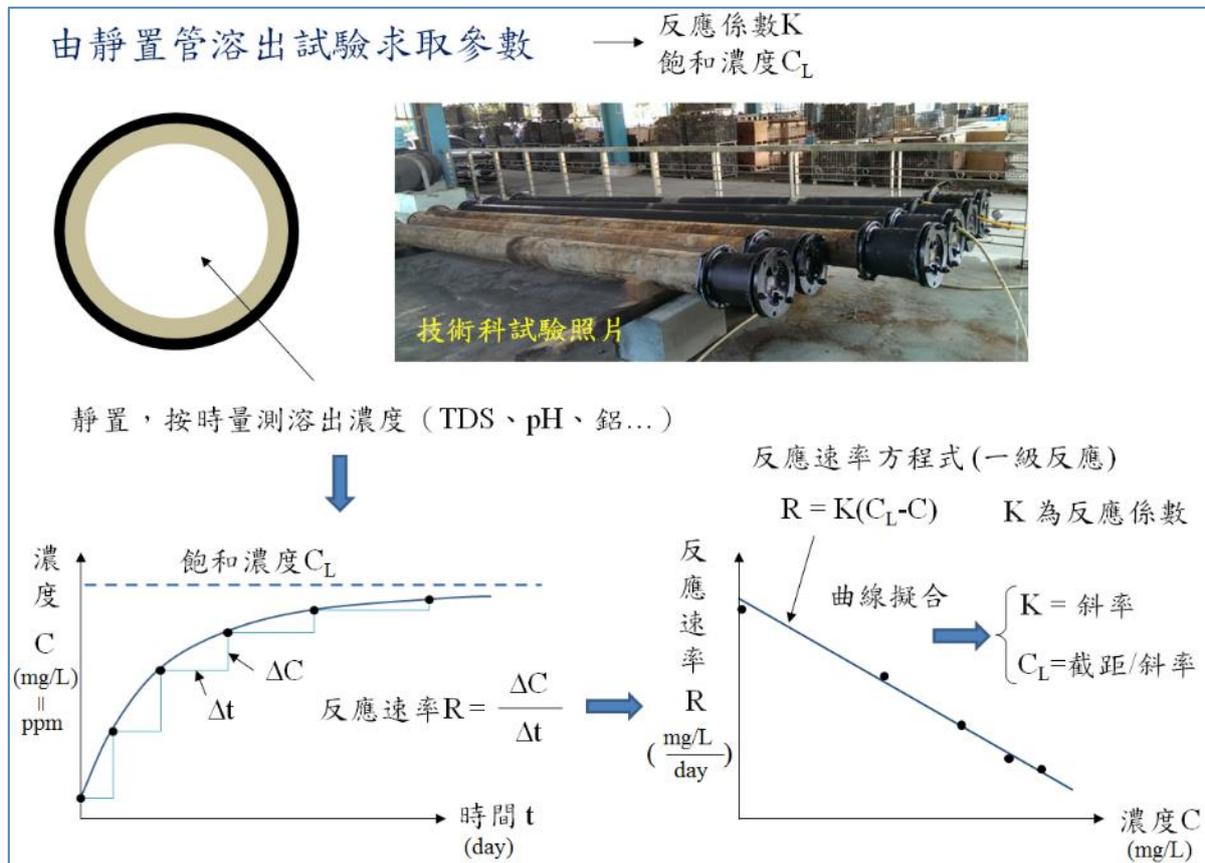


圖3-1 由靜置溶出試驗求取內襯兩項參數

欲求取K及 C_L 只需在實驗過程按時紀錄濃度C，並由數據計算出反應速率R，然後進行曲線擬合，詳圖3-1，內襯吐鹼的反應為一級反應(First Order Reaction)，擬合線段之斜率=K，截距/斜率= C_L 。本研究以總溶解固體TDS作為吐鹼量測對象，並選擇兩家國內大廠牌水泥內襯直管，以研磨/不研磨表層水泥乳的處理方式，共4組管線進行泡水靜置試驗，實驗數據詳圖3-2上圖，靜置泡水約6小時，全部都達到飽和，由圖中可看出大約泡水後半小時內TDS濃度飆升最快，之後增長很緩慢，直到飽和為止。以兩個數據點之濃度差以及時間間隔，便可計算反應速率R，隨後進行曲線擬合，詳圖3-2

下圖，擬合的4條線直線 R^2 相關性很高，均超過0.93以上。

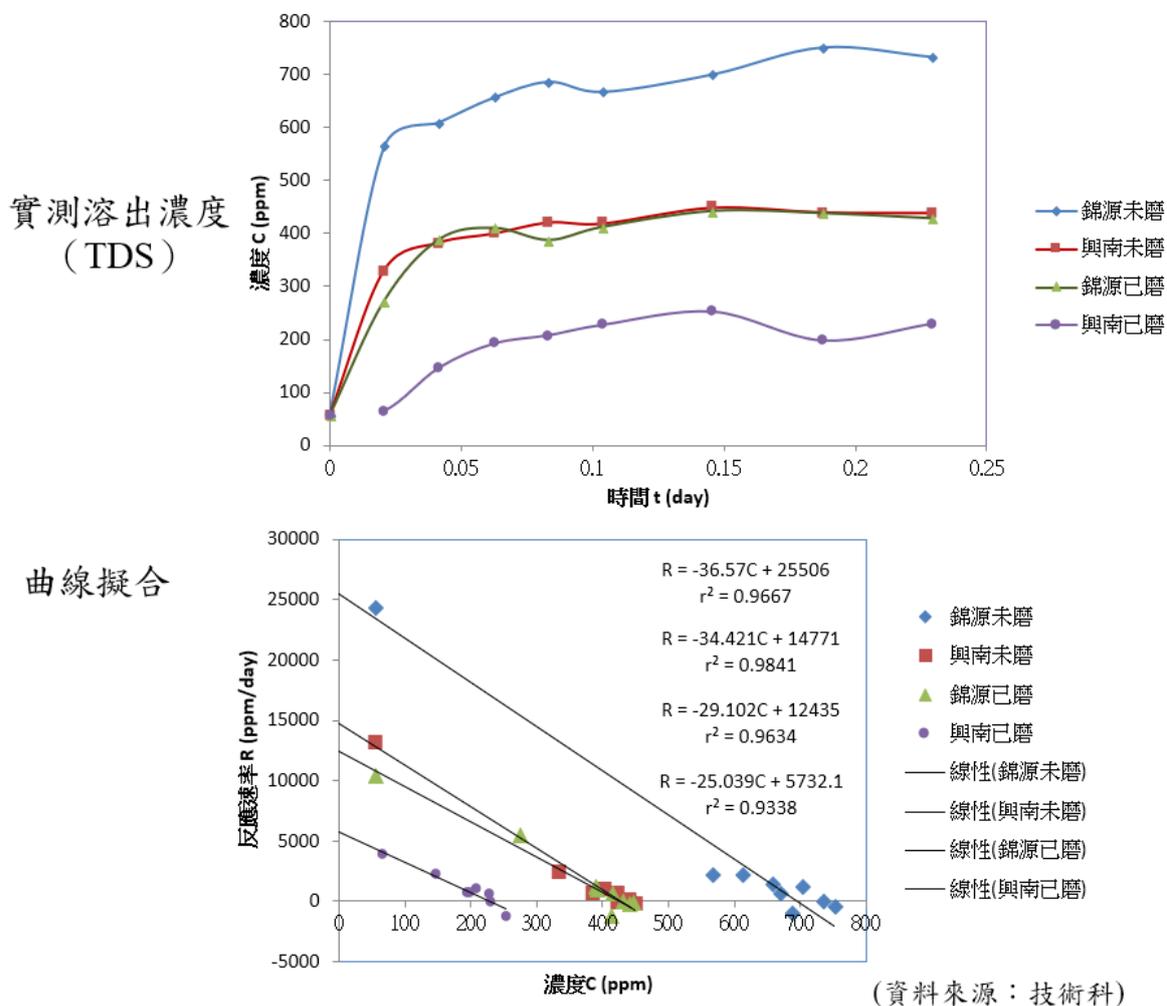


圖3-2 以4種不同管壁之TDS溶出實測值擬合出K及 C_L

擬合的4組參數，如圖3-3上方表格，明顯看出未磨內襯的試體，反應係數K較大，而且不同廠牌的飽和濃度也不同。試驗顯示TDS溶出的反應與一級反應吻合度很高，在「濃度－反應速率」座標中為直線，在「時間－濃度」座標中則為指數曲線，其漸進線為飽和濃度。

由於內襯面積與水體積的比例(A/V)將影響所擬合出來的反應係數K，口徑愈小，(A/V)愈大，K值就愈大，在國外的溶出試驗文獻也有同樣的發現，也就是使用同樣的內襯材質、靜置時間、溫度、水質也都相同，但口徑愈小的水管，達到飽和的速度愈快，其反應係數較大。該試驗均以口徑

200mm水泥內襯管進行靜置溶出，所以試驗所擬合出來的K值要加下標成為K₂₀₀，如果要套用到不同口徑的管線，例如150mm的管線，則要使用比例方式計算K₁₅₀，詳圖3-3下方的公式，以(A/V)的比例折算，所得之K₁₅₀將是K₂₀₀的4/3倍。

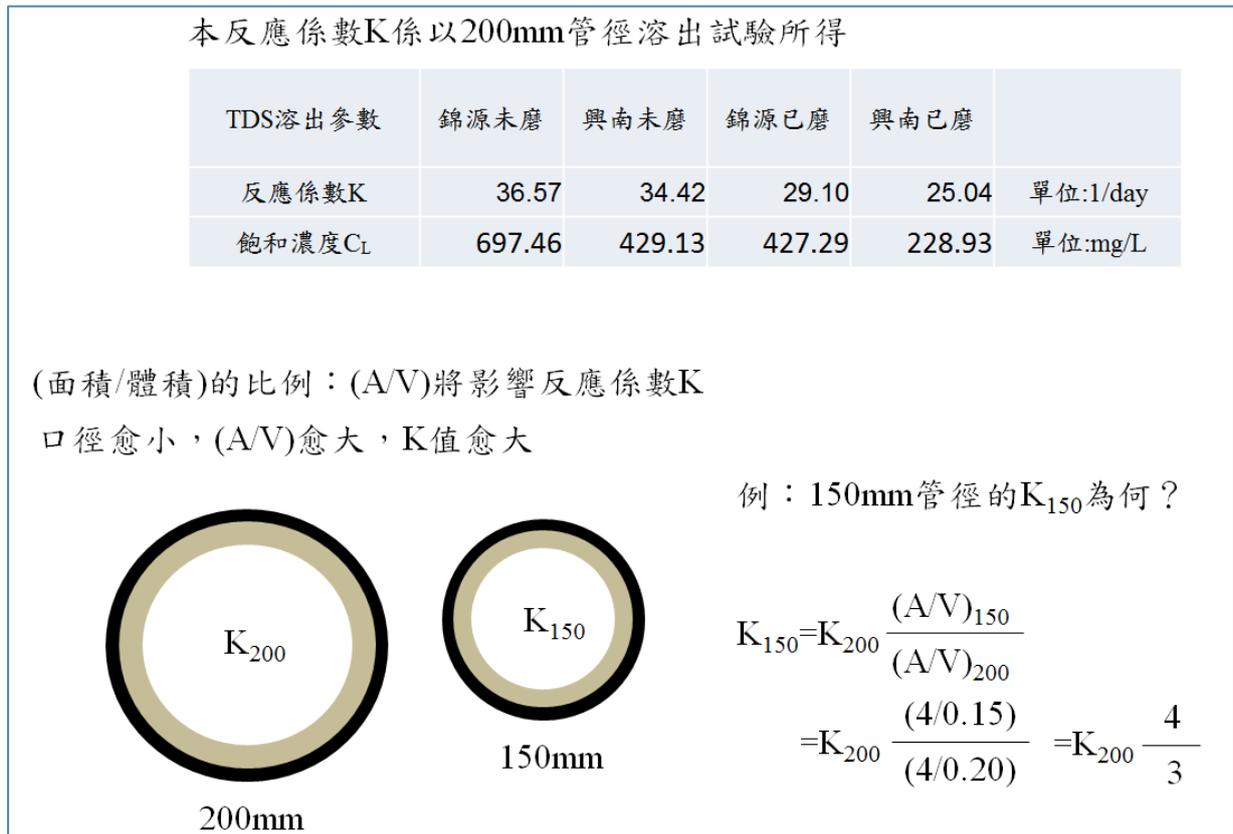


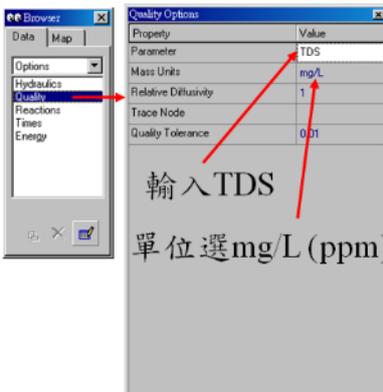
圖3-3 按照管徑尺度修正反應係數K值

經過上述試驗求取參數，便可對EPANET的管段輸入K及C_L，詳圖3-4所示，分別輸入對應的「水體反應係數」Bulk Coefficient及「極限濃度」Limiting Concentration，並記得按照口徑尺度修正K值。

EPANET有兩種K值，一個為K_b(Bulk Coefficient)，另一個為K_w(Wall Coefficient)，由於K_w無法模擬水體靜置狀態的反應，僅適用於有水流過壁面的接觸反應，因此以靜置溶出試驗所擬合的K值就是EPANET的K_b。

EPANET操作與設定

設定濃度單位



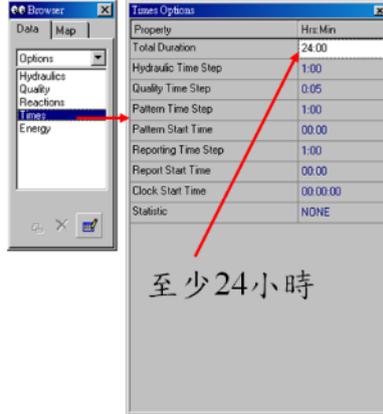
輸入TDS
單位選mg/L (ppm)

設定反應級數與飽和上限濃度



1級反應
輸入實驗所得之飽和濃度C_L

設定反應總時間

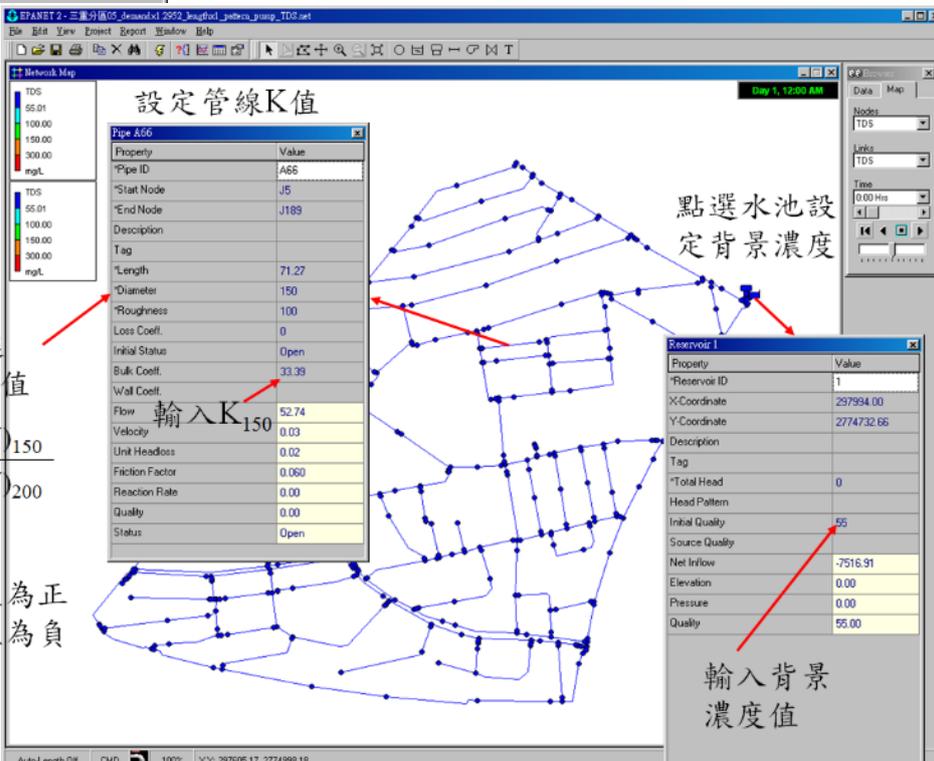


至少24小時

請按照口徑進行尺度修正K值

$$K_{150} = K_{200} \frac{(A/V)_{150}}{(A/V)_{200}}$$

濃度增長K值為正
濃度衰減K值為負



設定管線K值

點選水池設定背景濃度

輸入背景濃度值

圖3-4 EPANET內部的參數設定方式

為了驗證實驗所求得的反應係數K是否帶入EPANET之後能夠模擬最基本的靜置試驗，本研究在EPANET建立了4根配水管模型，詳圖3-5左上，這4根管線端點的需水量(Demand)都設定為零以模擬靜置狀態，由同一個水池(Tank)供水，將4組參數K及C_L設定到管段上，然後進行多時段分析，每個時間增量為1分鐘。執行的結果很令人滿意(圖3-5右上)，不論曲線增長趨

勢、飽和濃度漸進線，都與實測值(圖3-5右下)很接近。

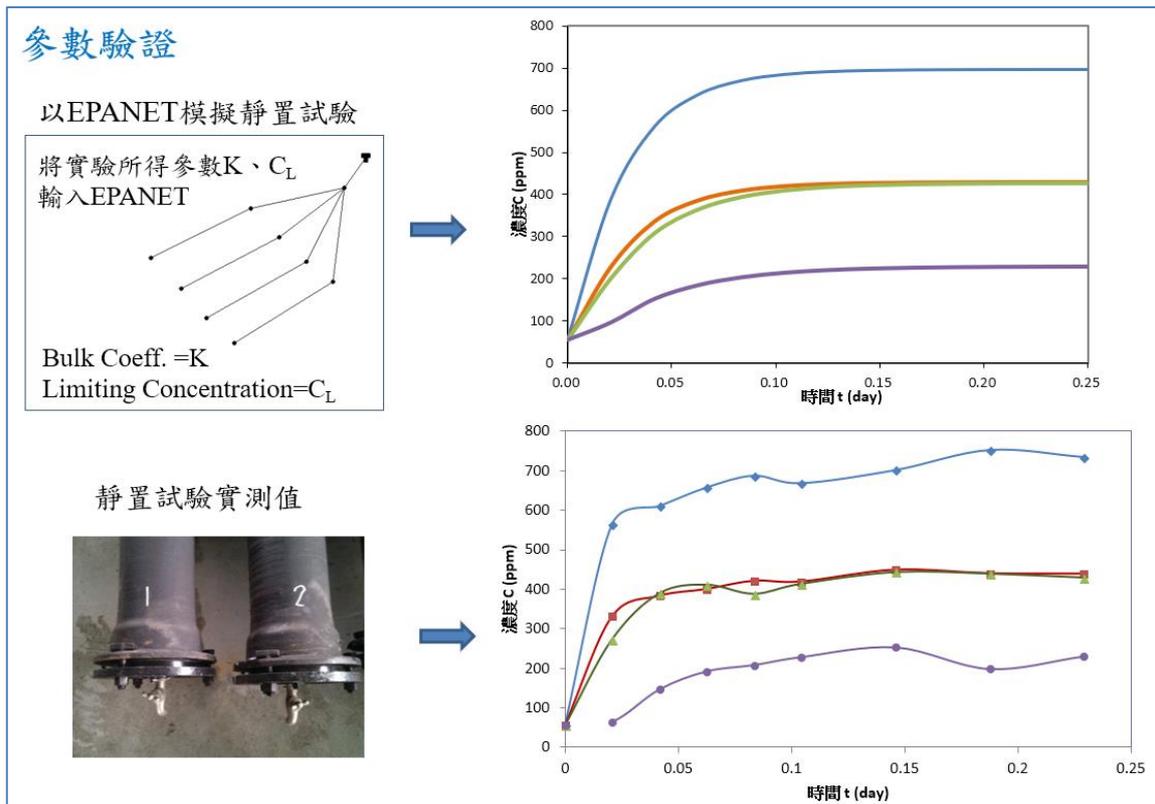


圖3-5 將擬合的參數套入EPANET，模擬4根靜置溶出濃度

3.1.2 新管吐鹼之管網擴散模擬

由前一節的介紹，泡水試驗量測TDS數據所求得之管壁溶出反應參數 K 及 C_L ，帶入EPANET能夠非常完美模擬內襯泡水溶出行為，驗證了EPANET的可用性，接著便可套用到實際管網中，模擬管網流動狀態下，水泥管壁釋放到水中的TDS濃度增長以及擴散方式。

本研究選擇北水處三重某個區塊，詳圖3-6之I區，配水管長度為20公里，約為4~5個小區合併起來的一個中區，區內制水閥全開、邊界制水閥全閉，為單一進水，與管網直接相連的水表共有1136栓。本區的EPANET水理模型係經過現場量測消防栓水壓，比對模型運算出來的水壓，完成管壁粗糙係數、節點高程之校正，兩者極為吻合。

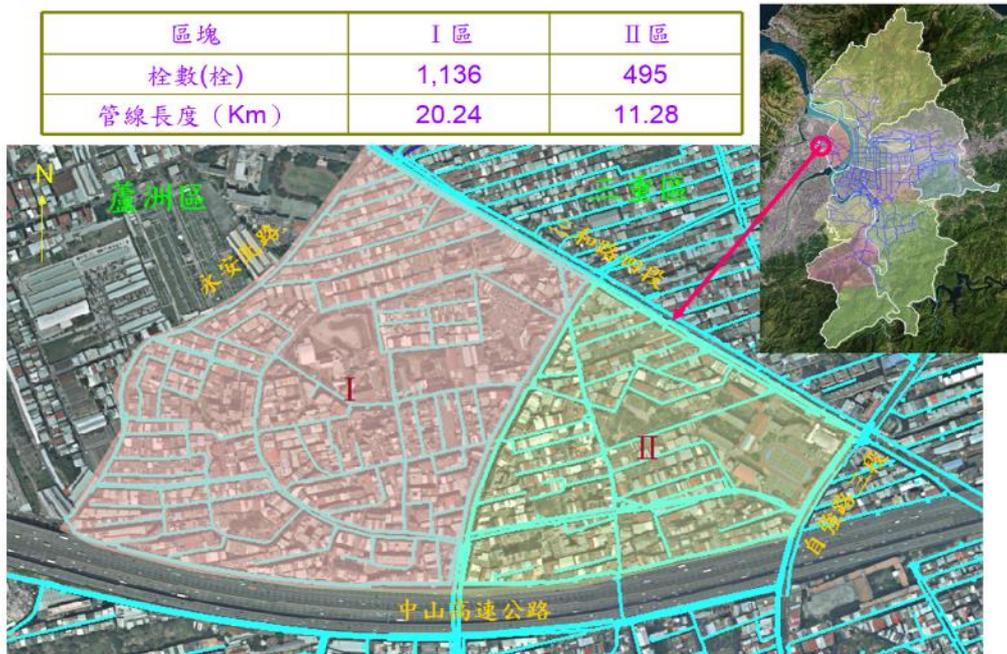


圖3-6 以實際中區模擬流動狀態下管壁溶出到水中的TDS擴散

進水管吐鹼：該區域由東北角進水後，即分為兩線輸送，為了解入口端新管內襯吐鹼對整個區塊的影響，故於其中一線模擬埋設160公尺的新管線，口徑200mm，分別以水泥內襯「未磨/磨掉」的試驗實測參數，以上一節介紹的方式帶入EPANET，模型其餘參數均相同。

「未磨」內襯的模擬結果，詳圖3-7所示，管網中由上游到末端的a、b、c、d四個節點均無TDS濃度超標問題，主要為管網水流不停稀釋，雖然未磨掉內襯水泥乳，其吐鹼的反應係數K值很大，但管內水體尚未及吸收足夠鹼性物質，就已經流走了，被新鮮的水取代。至於TDS移動擴散的方式，詳圖3-7下圖，明顯被拘限在管網下半部，因為上半部由另外一根管線供水，其「勢力範圍」內完全不含下半部內襯吐鹼的成分，只有55 ppm的背景值，井水不犯河水，下半部TDS擴散速度約7個小時抵達管網末端，之後濃度及擴散範圍變化不大。

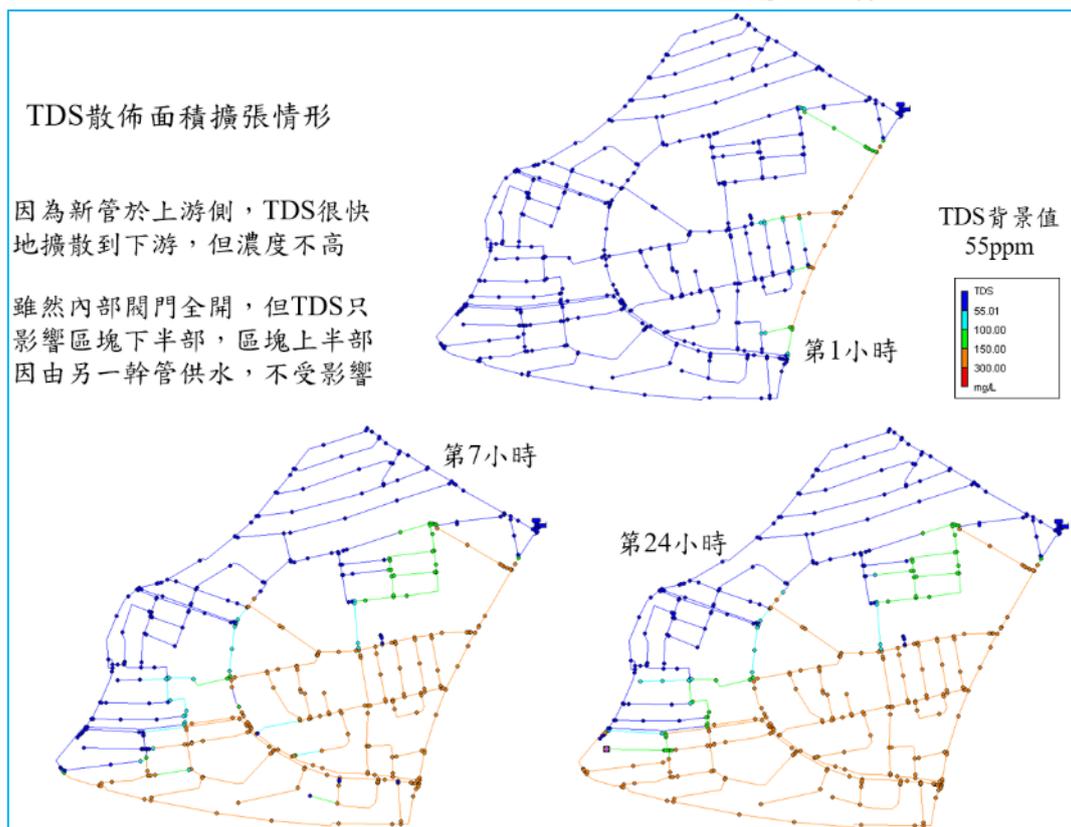
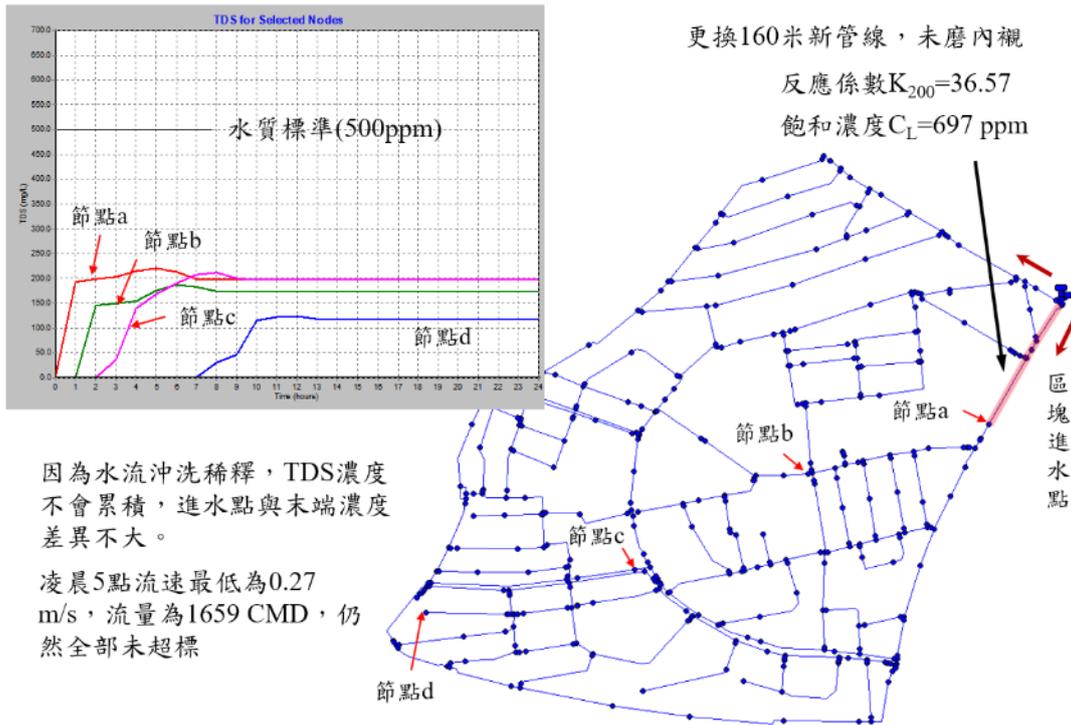


圖3-7 區域入口埋管(未磨內襯水泥乳)：TDS濃度變化及擴散分析

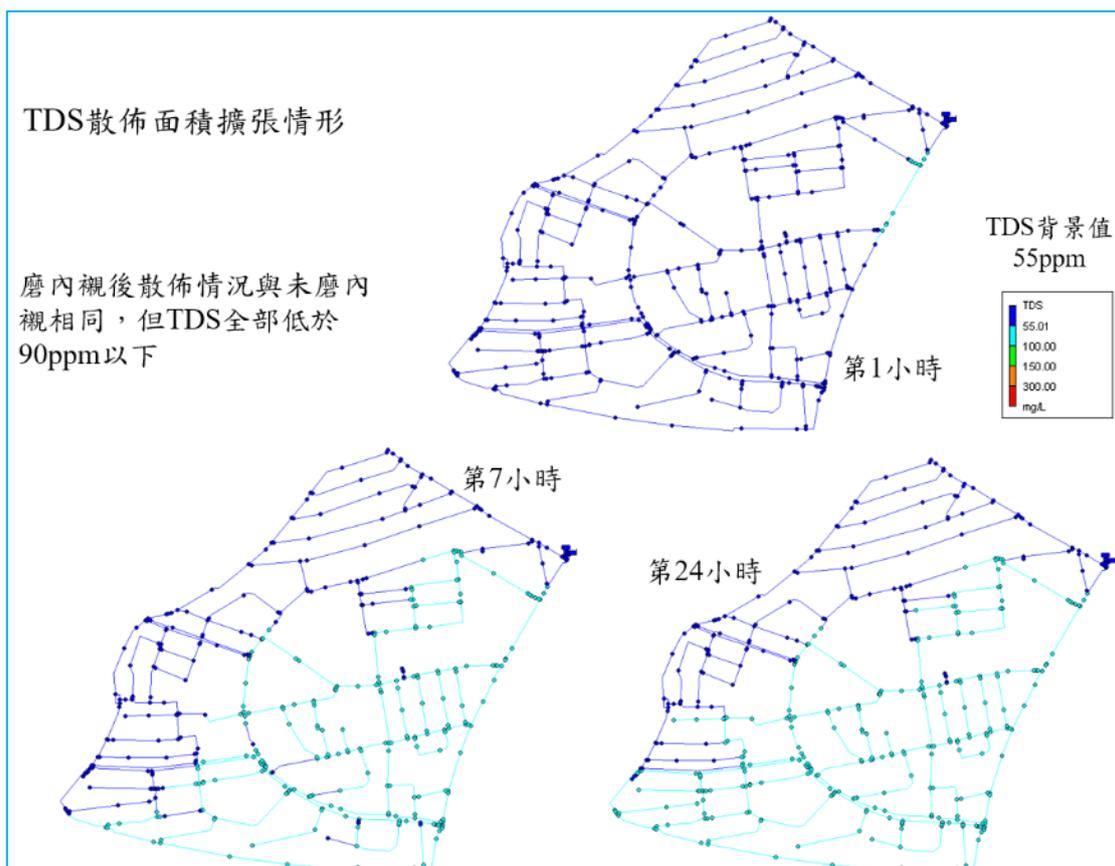
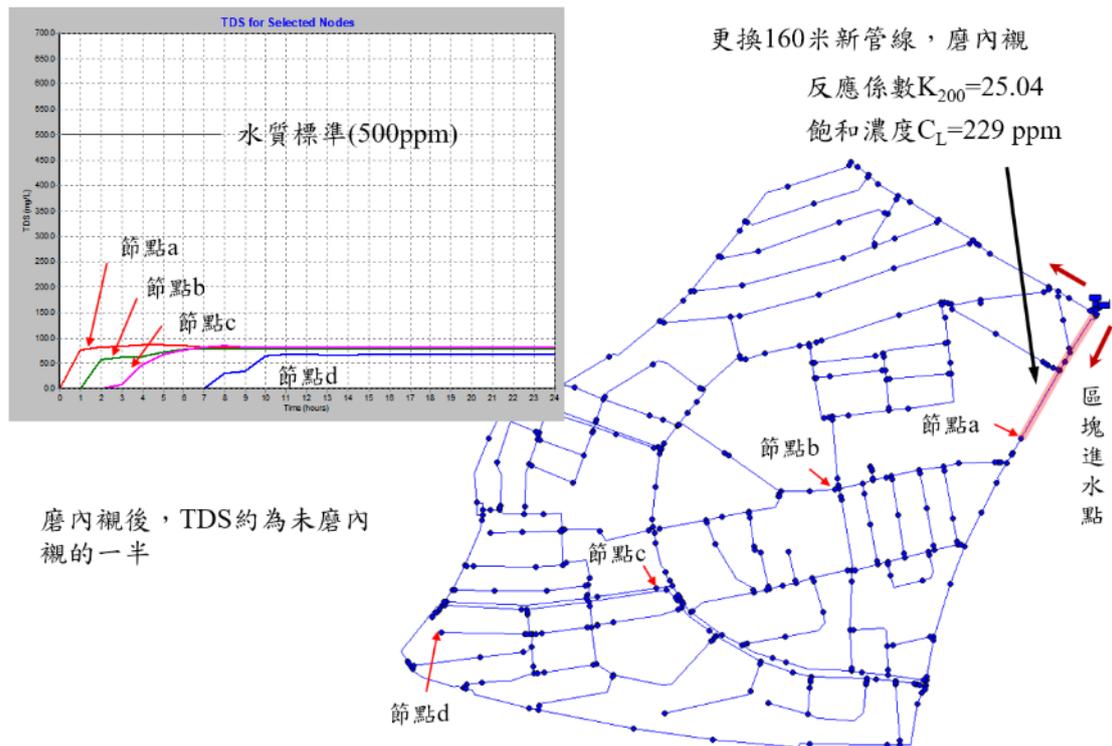


圖3-8 區域入口埋管(磨掉內襯水泥乳)：TDS濃度變化及擴散分析

「磨掉」內襯水泥乳，模擬結果詳圖3-8所示，雖然吐鹼的反應係數 k

值為「未磨」的7成，但節點a、b、c、d的TDS濃度僅剩下一半，降幅更大，詳圖3-8下圖，擴散的範圍與「未磨」的模擬結果完全相同，也就是TDS散佈的勢力範圍僅侷限於下半部管網，只是各點濃度幾乎都一致，顏色都是未達100 ppm的淺藍色。兩個不同內襯參數的模擬顯示，TDS濃度與500 ppm的水質容許標準有很大的差距，代表新管埋設於「流量」充沛的管段時，不需考慮吐鹼超標問題。

管網末端吐鹼：若比照上述模擬的方式，以同樣的參數、同樣的管網模型，但選擇該區域最末端的管線，予以汰換160公尺的管線，比對內襯水泥乳「未磨/磨掉」的差異，以了解末端管網汰換為新管後，內襯水泥吐鹼的擴散行為，以及TDS濃度是否超標的問題。

「未磨」內襯的模擬，詳圖3-9所示，選擇的四個節點a、b、c、d，其中a、c直接選定於新管線上，a節點是管尾，而b、d則是選擇鄰近的既有管管尾。結果顯示TDS濃度均迅速攀升，尤其是新管的管尾a節點，埋入後3小時就達到飽和濃度700 ppm，不但超過水質標準500 ppm而且不會下降，與實驗室浸泡試驗的濃度發展曲線完全一樣。在管身上的c節點則一開始濃度飆升，但由於仍有水流動稀釋，因此TDS濃度回跌。鄰近既有管尾b、d節點則係因新管吐鹼流動到該處，導致TDS於2小時之後開始升高，到7小時達到最高峰，然後開始下滑。TDS擴散的範圍詳圖3-9下圖，僅侷限於一小塊區域，但由於管網末端整體流動性不足，受到影響的區域TDS濃度偏高。

「磨掉」水泥乳的情況，模擬結果詳圖3-10，縱使節點a的TDS濃度很快增長至飽和，但僅發展到229 ppm，其餘節點也僅100 ppm上下，均無超標問題，顯見只要磨掉內襯水泥乳，就可控制吐鹼情況。

此外，末端吐鹼的影響與水流動方向有很大的關係，詳圖3-11，由流向箭頭顯示某些鄰近管段直接由新管供水，導致TDS居高不下。

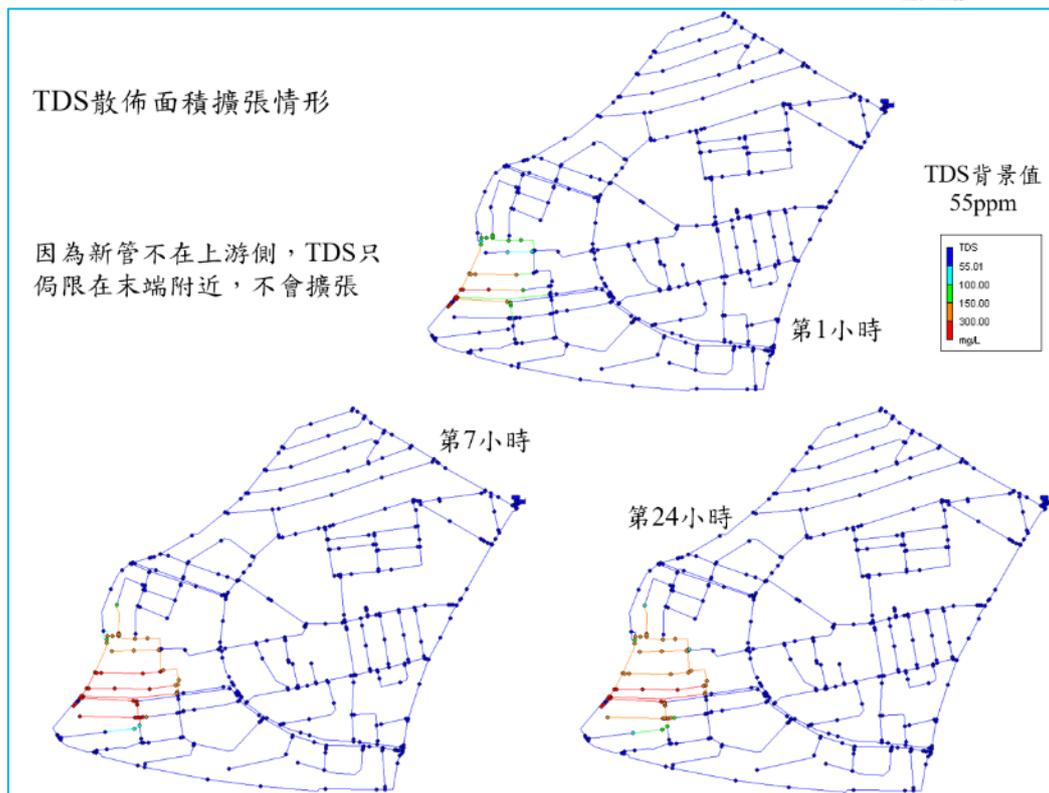
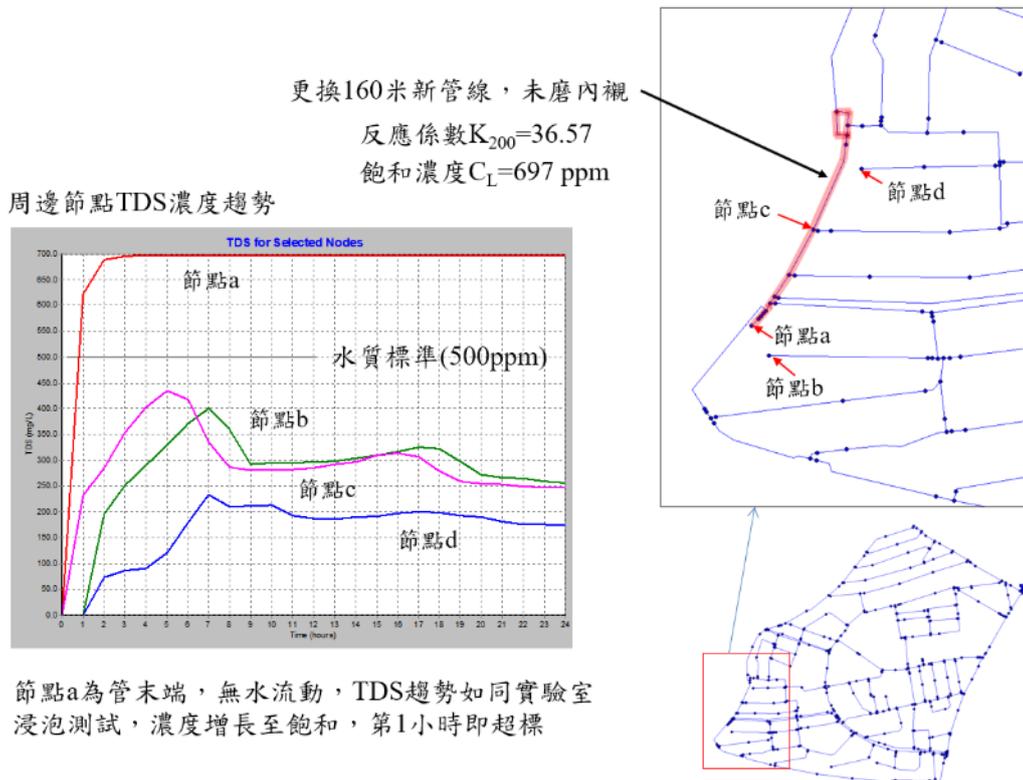
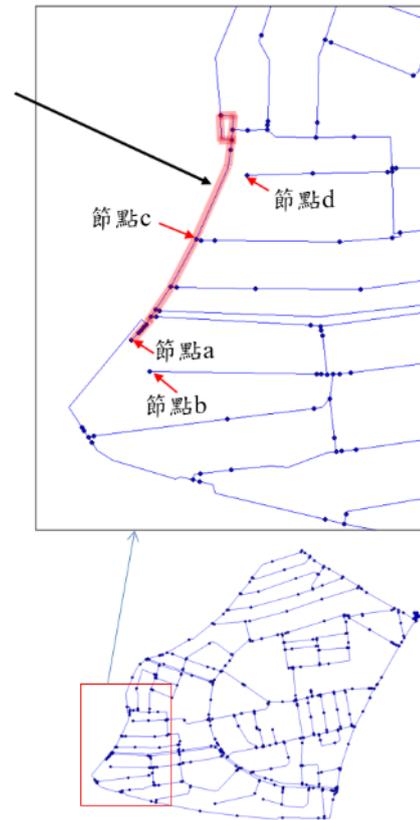
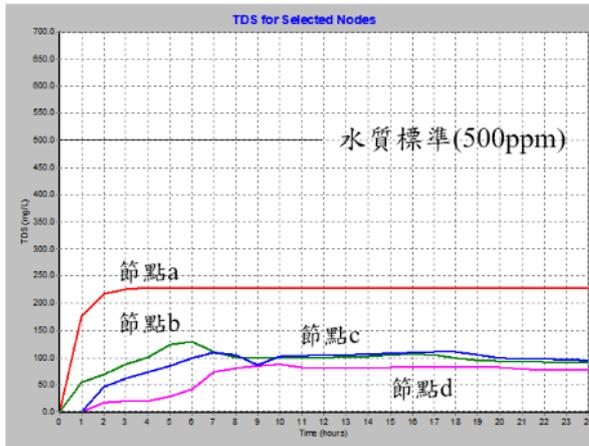


圖3-9 區域末端埋管(未磨內襯水泥乳)：TDS濃度變化及擴散分析

更換160米新管線，磨內襯
 反應係數 $K_{200}=25.04$
 飽和濃度 $C_L=229$ ppm

周邊節點TDS濃度趨勢



磨內襯後，隨然管末端無水流動，TDS濃度增長至飽和也不會超標

TDS散佈面積擴張情形

除末端TDS達229飽和濃度，其餘附近TDS濃度最高僅約150ppm，遠低於容許標準

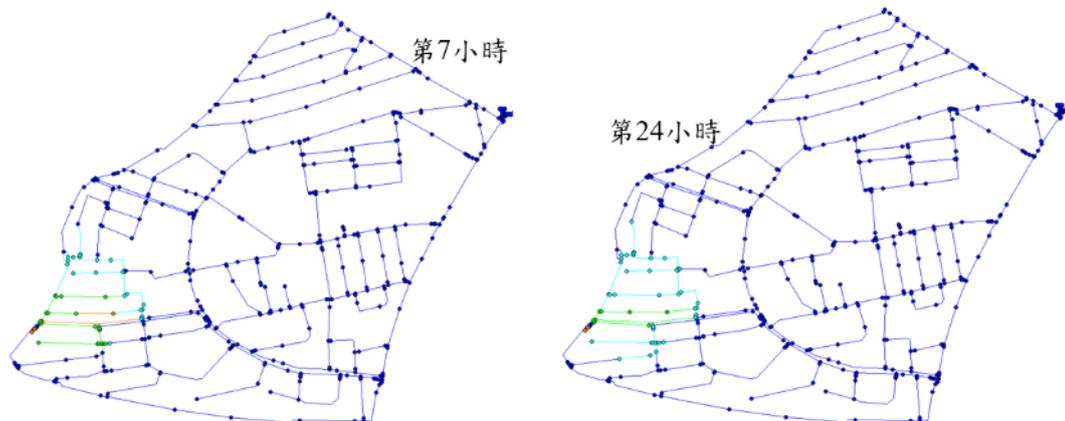


圖3-10 區域末端埋管(磨掉內襯水泥乳)：TDS濃度變化及擴散分析

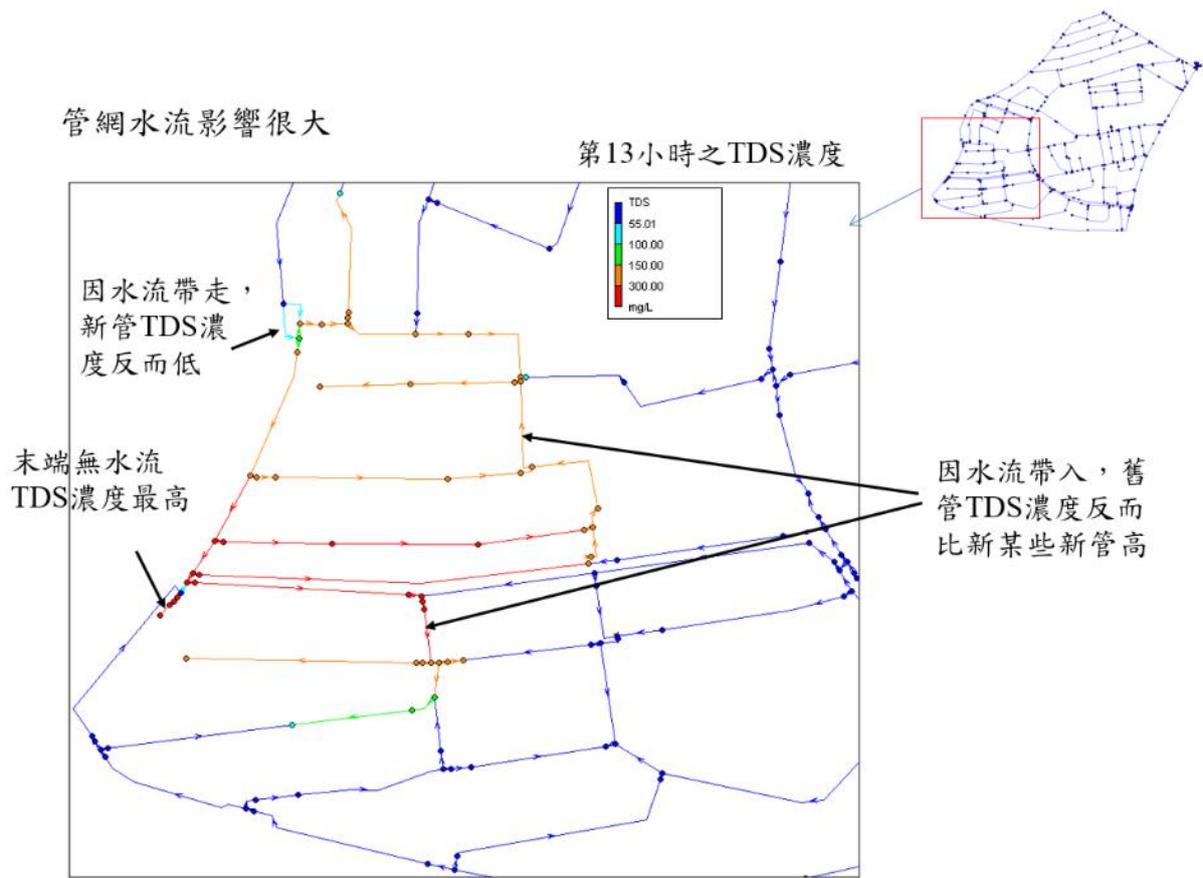


圖3-11 區域末端埋管(未磨水泥乳)之TDS擴散分析局部放大

管網中間管段吐鹼：選擇管網中央某根流量較小的管線，更換為新管線，模擬內襯水泥乳「未磨/磨掉」的差異。

「未磨」內襯的模擬，詳圖3-12所示，由於該管段流量介於21~32 CMD，稀釋能力不足，導致TDS迅速飆升至超標的700 ppm，但由於一直有水流帶走，隨後濃度開始下降，至21小時TDS才低於水質標準500 ppm，下游端的濃度則因為混和新管吐鹼以及其他乾淨水源，因此TDS均未超標。「磨掉」水泥乳的情況，模擬結果詳圖3-13，僅有更換新管處的TDS較高，但並不會超標，而且不會達到飽和濃度229 ppm，隨著管網水流稀釋帶走鹼性物質，其濃度漸次降低。

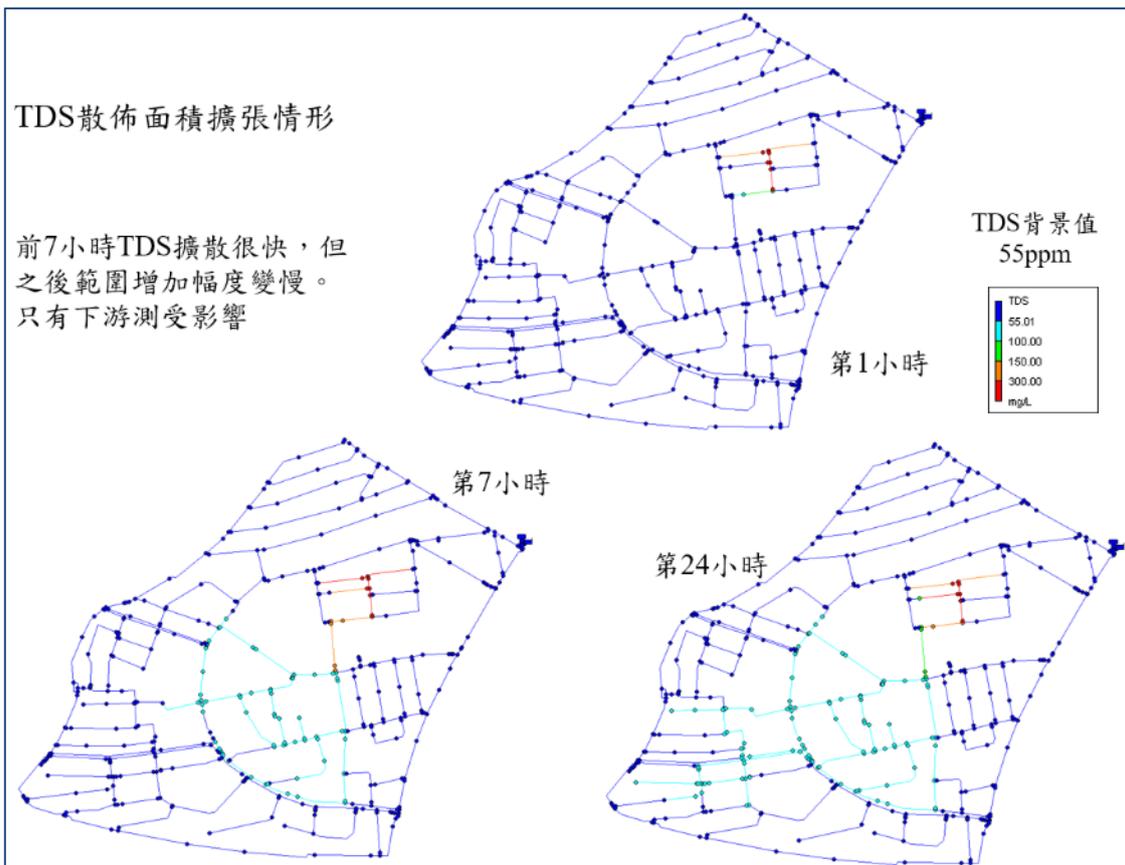
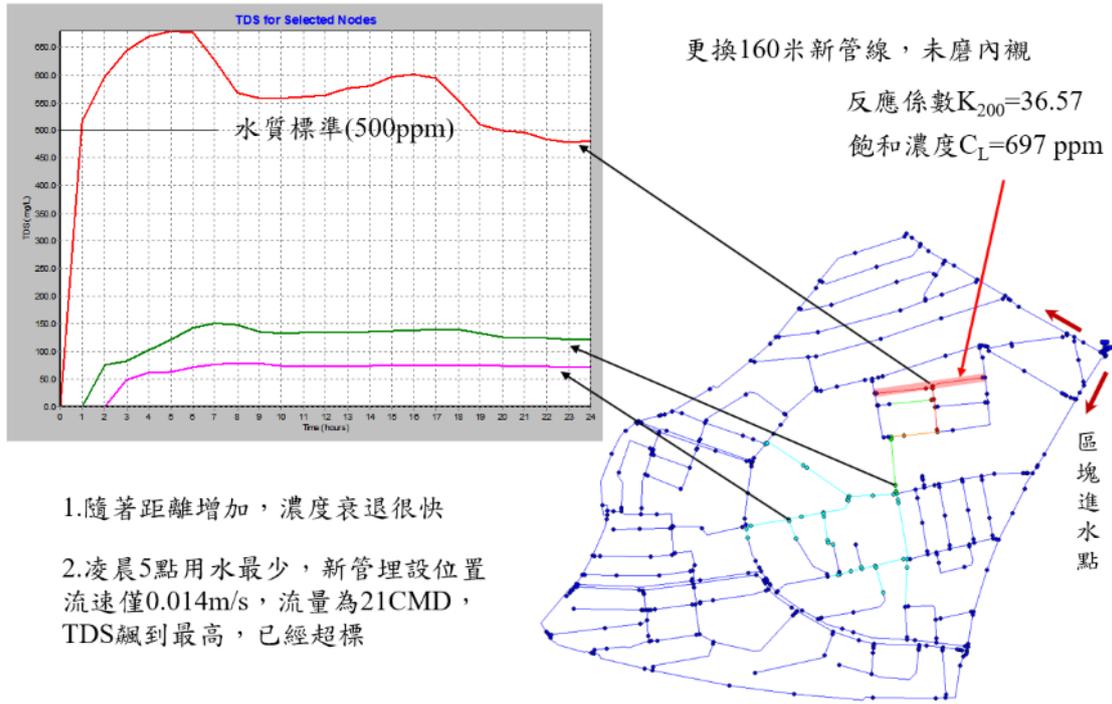


圖3-12 區域中間埋管(未磨內襯水泥乳)：TDS濃度變化及擴散分析

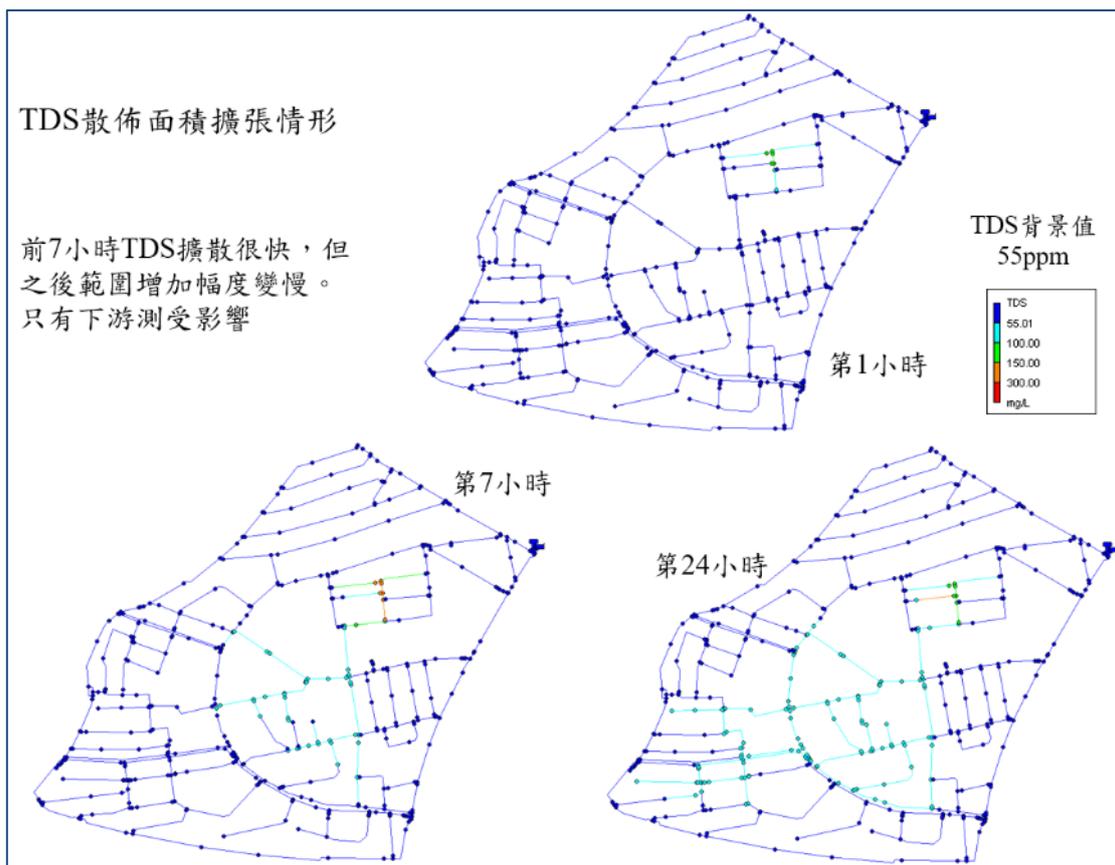
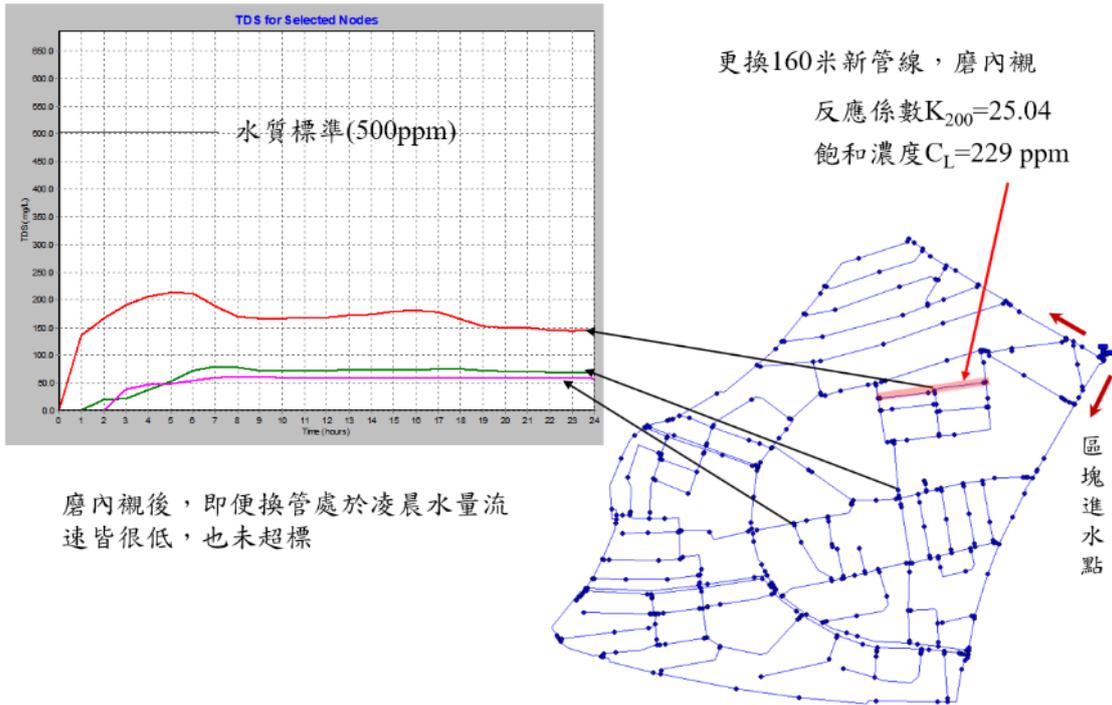


圖3-13 區域中間埋管(磨掉內襯水泥乳)：TDS濃度變化及擴散分析

內襯選用考量：由三種新管線設置位置(進水端/末端/中間)搭配兩種內

襯狀態(未磨/磨掉水泥乳)，發現最主要的控制因素為內襯狀態，只要磨掉內襯表層薄薄的水泥乳，不管設置在哪裡都不會超標，但設置於管末仍有吐鹼濃度達飽和的問題，雖然TDS未超標，但用戶仍可能反映自來水口感不好，或者水質有滑膩感。因此，本研究建議管末端、流量小的管段、或者高地系統，應改採非水泥砂漿內襯的粉體塗裝，將是一勞永逸的作法，而位於平地管網中，流量較大的配水管段，由於水量充沛足以稀釋，仍可安心採用水泥砂漿內襯。

3.1.3 管壁自潔淨流速分析

前一節之水泥內襯吐鹼濃度，與「流量」較有關係，因為流量是度量管中水體積移出移入最直接的指標，而且吐鹼的化學物質溶於水，TDS濃度值會隨著單位時間內水體移入移出的速率，即流量而變，零流量的管段很快達到飽和濃度，然而流量大、水體移入速度快的管段，TDS濃度不會增長到飽和，甚至還會下滑至接近背景值。

管網流速與雜質沉降：然而管網中許多不溶於水的物質，如細泥、砂粒、壁體碎片...，會隨著水流移動速度的快慢，而有揚起及沉降的行為，當上述物質移動到流速緩慢的管網末端或管尾時，就傾向於沉降下來，甚至凌晨用戶用水較少的時候，這些末端管段的流速等於零，更是雜質大規模沉降的好發時段，而且流速緩慢的管段，管壁生物膜欣欣向榮，不會被水流刮搔剝落，恣意生長。至於管網某些重要幹線，肩負輸送整片區域的用水，或口徑較小的瓶頸管段，因為流速快，日夜不停輸送，雜質沒有機會沉降下來，而且管壁內襯劣化剝落、或產生的氧化鏽粒物質、管壁生物膜...等等，也會被沖刷帶走。也就是透過水理模型分析所得之流速分布，可以大致辨識管網的「沉降區」及「沖刷區」。沉降區的管線如果沒有透過消防排水，以人為手段增加流速帶走沉降物質，則日積月累下，管底積泥

將成為管網運營的風險因子，施工停水、復水，或操作制水閥調配水量時，容易揚起鬆軟底泥，四處亂竄造成廣大水污染。

各國清潔管網傳統的作法，多透過消防排水(Hydrant Flushing)達成底泥的排除，美國或英國的水務公司一般都增加管中流速，至少達2.5~5.0 pfs(feet per second)，換算成公制為0.75~1.5 m/s，並進行2~3輪的排放。但經過長年來的經驗，發現「事後排水」執行的成效不彰，往往因為管網先天水壓不足，或消防栓配置因素，某些管段中的積泥污垢就是排不出去，甚至操作人員因畏懼排水過程揚起的底泥吸入家戶水池造成污染，不但減少排水次數、縮短排水時間、刻意緩緩排水，讓流速根本無法提升到能夠刮除底泥的程度，導致有些管段積泥沉降速度大於排水清潔速度，管中污垢愈來愈厚。

自潔淨流速：因此，近十多年來歐美開始有許多水務公司倡議供水管網應具備「自潔淨」(Self-cleansing)能力，當配水管新設、更換時，設計人員不能只是依循過去保守的準則，將安全係數放得很大，然後算出帶有小數點的口徑又無條件進位加碼，讓管網口徑「過度設計」(Over designed)，因為許多先進國家的人口已經不能以二戰後大幅增長的推估法，用戶的省水器材耗水量也大幅減少，再加上管網漏水控制有成，許多城市管網配水不增反減。依據荷蘭KWR水循環研究機構的Blokker、Vreeburg等人2011年於國際WDSA大會發表的研究⁷⁷指出，具有自潔淨能力的管段，流速必需至少0.2~0.25 m/s。

東英格蘭地區的盎格魯水公司(Anglian Water)2018年版的供水管網設計手冊⁷⁸中也可查到「自潔淨」之最低流速的規範：

- 1.普通配水管：每天必須至少一次流速達0.3 m/s，持續1分鐘
- 2.無內襯鑄鐵管：每天必須至少兩次流速達0.2 m/s，持續1小時

3.原水管：水中雜質及微生物較多，流速必需持續維持在0.75 m/s

盎格魯水公司的自潔淨設計原則，採用流速校核法，不去調整既有設計公式，使用起來比較單純，如果北水處也套用此規範，將是檢核所計算出的日配水量之「最大時」流速達到0.3 m/s即可。

然而北水處在過去「追趕需求」年代設計與建造的管網系統，普遍Over designed，因為當時深怕埋入的管線口徑太小，無法滿足激增的人口，自潔淨流速的設計並不在考量之中，即便2006年啟動的管網改善20年長程計畫，設計人員也都是按照「原口徑」汰換的原則，並不會刻意滿足最低流速而去縮小管線口徑，甚至還放大一號管徑進行汰換，因此目前北水既存供水管網口徑過大的情況並不意外。

北水處管線口徑過大：由本研究的水理模型計算出的流速分布圖，詳圖3-14所示，為區域用水尖峰時期22:00的「最大時」流速，令人吃驚的是96%的管線流速都低於0.5 m/s，如果以東英格蘭盎格魯水公司認為的最低自潔淨流速0.3 m/s來看，該區甚至85%的管線流速低於標準，若以荷蘭KWR研究機構的0.25 m/s規範檢視，也高達81%的管線流速未達標，綜合兩個國外規範，也就是本區超過八成的管線無法自潔淨，為水中雜質的廣大沉降區，必需仰賴操作人員定期排水清除積泥，只有靠近區塊邊緣的管線流速較快，能夠自行帶走雜物。

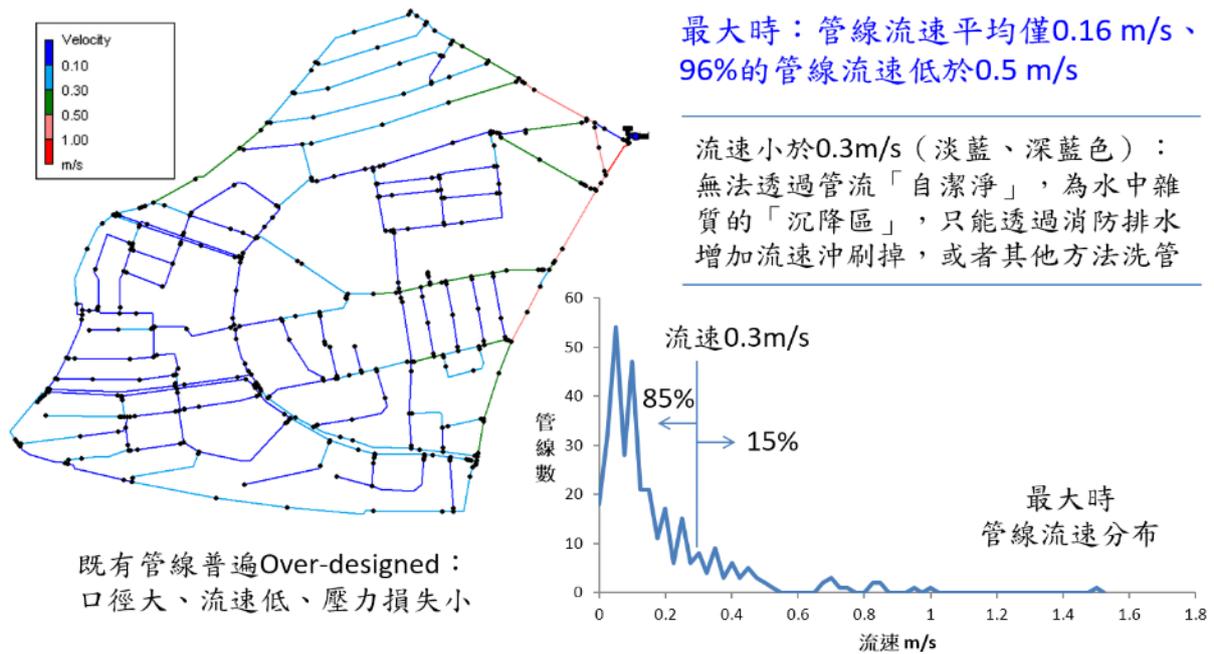


圖3-14 本研究區域管網「最大時」流速分布圖與分佈比例

水質敏感區：圖3-14左圖流速最低的深藍色管段，標誌著管網用水尖峰最大時流速都還低於0.1 m/s，可稱為「近乎滯留」管段，幾乎任何雜物均發生沉降，底部積泥與管壁生物膜生長最厚，尤其是承插接頭處，插口與承口間總是有數公分的縫隙，特別容易藏污納垢，如果施工當時為了閃避障礙物，使用了很多的承插彎頭，將使得容易卡髒污之處一下子增加許多，風險大增，一旦操作制水閥突然改變流速、流向，這些沉積雜物將被揚起。因此建議將上述流速低於0.1 m/s的管網定義為「水質敏感區」，可透過EPANET水理分析得到視覺化的風險地圖，並再額外補上管網操作及施工人員遭遇實際污染的地點，讓水質敏感區更有參考價值，例如許多原本流速不慢的管段，由於制水閥被長期關閉，形成不流通的管段，形同管尾，這些不正常關閉的閥門或許能夠在EPANET模型校正時候挑出來，但第一線操作人員的回報資料更為珍貴，尤其是局部小範圍的變化，有時比起模型運算更為有用。而模型的分析則適用於較大範圍的一次性運算，得到宏觀的水質敏感區域。未來建立起這樣的風險地圖，在管網操作上能謹慎調整制水閥，緩開緩關；在管網設計上也能適度縮小管徑，達成自潔淨的功能。

雖然流速稍增，水頭損失隨之提升，泵站耗能也略為增加，但比起人工排水的耗時費力，水污染時面臨的賠償與損害企業形象，些微耗能是必要的，建立水質敏感區的風險地圖也是必須的。

3.2 DIP管內部粉體塗裝對水質之影響

3.2.1 雙酚A簡介及對健康之影響

環氧樹脂的主要原料為雙酚A(bisphenol A)或表氯醇(或稱環氧氯丙烷，epichlorohydrin)，硬化劑可能為胺基(芳香族胺或脂肪族胺)或氫氧基化合物(酸酐)，溶劑可能為酮類(如丁酮、甲基異丁酮等)。依據文獻指出，環氧樹脂與水長期接觸時，可能劣化溶出雙酚A及其衍生物，包括雙酚A二環氧甘油醚(bisphenol A diglycidyl ether)、雙酚A二縮水甘油醚(BADGE, bisphenol A diglycideryl ether)、雙酚A聚丙氧烯醚(bisphenol A-propoxylate)、雙酚F(bisphenol F)、雙酚F二環氧甘油醚(bisphenol F diglycidyl ether)、雙酚F二縮水甘油醚(bisphenol F diglycideryl ether)、雙酚A聚丙氧烯醚(bisphenol F propoxylate)等物質，其中又以雙酚A為最主要溶出物質，含量也相對較高。雙酚A係目前國際上所關切的環境賀爾蒙，同時我國行政院環境保護署亦將其列為飲用水水質標準新興污染物管制項目候選清單。

有鑑於北水處正評估考量引進DIP環氧樹脂粉體塗裝管或DIP水泥襯裡環氧樹脂密封塗層管，設置於接水用戶較少、滯留期較長的高地供水社區，唯恐環氧樹脂塗層可能有溶出雙酚A的風險，爰進行本溶出試驗，以評估風險。為了解DIP管環氧樹脂粉體塗裝及水泥襯裡密封塗層管材與自來水接觸後是否會溶出新興污染物雙酚A(Bisphenol A;BPA)，雙酚A，又稱酚甲烷，在1891年間為俄羅斯化學家Aleksandr Dianin首次合成出來。直至1950年代時，拜耳(Bayer)及奇異(GE)公司的化學家才發現在生產聚碳酸酯(PC)塑膠時，雙酚A可用來強化塑膠的防碎性與透明度，並是製造環氧樹脂的主原料

之一。

雙酚A是一種外因性內分泌干擾化學物質(Envirnmental Endocrine Disrupting Chemicals)，或稱為環境荷爾蒙Environmental Hormones)，其成分即使少量也可能導致健康危害。若長期暴露可能導致孩童青春期早熟、肥胖、糖尿病、過動症、記憶受損，也可能增加乳癌、睪丸癌、前列腺癌的發生率，這些健康上的影響，並非短時間就可看出，有時要到第二代甚至第三代才會出現，正因為它具有「延宕長期效應」，所以也被視為跨代之「毒」。

依據歐洲食品安全局(EFSA)的風險評估資料指出，一般人主要透過飲食、化妝品、感熱紙與塵埃四種途徑暴露雙酚 A。高劑量的雙酚 A 對動物的生殖系統有不良影響，在人體內則會干擾性荷爾蒙，造成其功能混亂，對乳腺、生殖、代謝、神經行為與免疫系統的潛在健康效應仍存在著不確定性，無法排除可能影響。許多研究指出雙酚 A 可能影響腦部發展，包括對神經發展的影響與基因的表現、對神經內分泌的影響、對特定的腦部區域的影響等。

根據動物實驗顯示，雙酚A可能影響造血系統，動物親代在妊娠期間暴露雙酚 A，可能提高子代肝癌與乳腺癌的發生率。在極低的濃度之下(10 ppb 以下)會干擾小老鼠胎兒的生長，另外在細胞研究亦發現在濃度1 pico-mole 及 1 nano-mole 極低濃度下，會造成細胞功能改變。

根據調查顯示，國人暴露之情況，成年人每日經由食物攝取到雙酚A 平均含量為 $25.88 \pm 22.1\mu\text{g}$ ，其中每日由飲水攝取雙酚A之攝取量約為 $5.63\mu\text{g}/\text{day}$ ；另塑膠瓶裝水之平均濃度 $7.7\mu\text{g}/\text{L}$ (檢出率100%)，均較自來水之平均濃度 $2.89\mu\text{g}/\text{L}$ (檢出率47%)，高出許多。

3.2.2 研究方法

設置DIP直管3支，管徑200mm、管長60公分，兩端分別以管塞密封，同時設置水龍頭，以便充填萃取試液及採集水樣，3支直管管材分別為：

編號# 1：DIP鑄鐵管+環氧樹脂粉體塗裝

編號# 2：DIP水泥襯裡+環氧樹脂密封塗層

編號# 3：DIP水泥襯裡管(對照組)

另設置1噸不鏽鋼試液儲存筒1個，依需求配置進水管，及各管材取樣水龍頭，如圖3-15、3-16所示，先以自來水充分洗管，以備試驗進行。

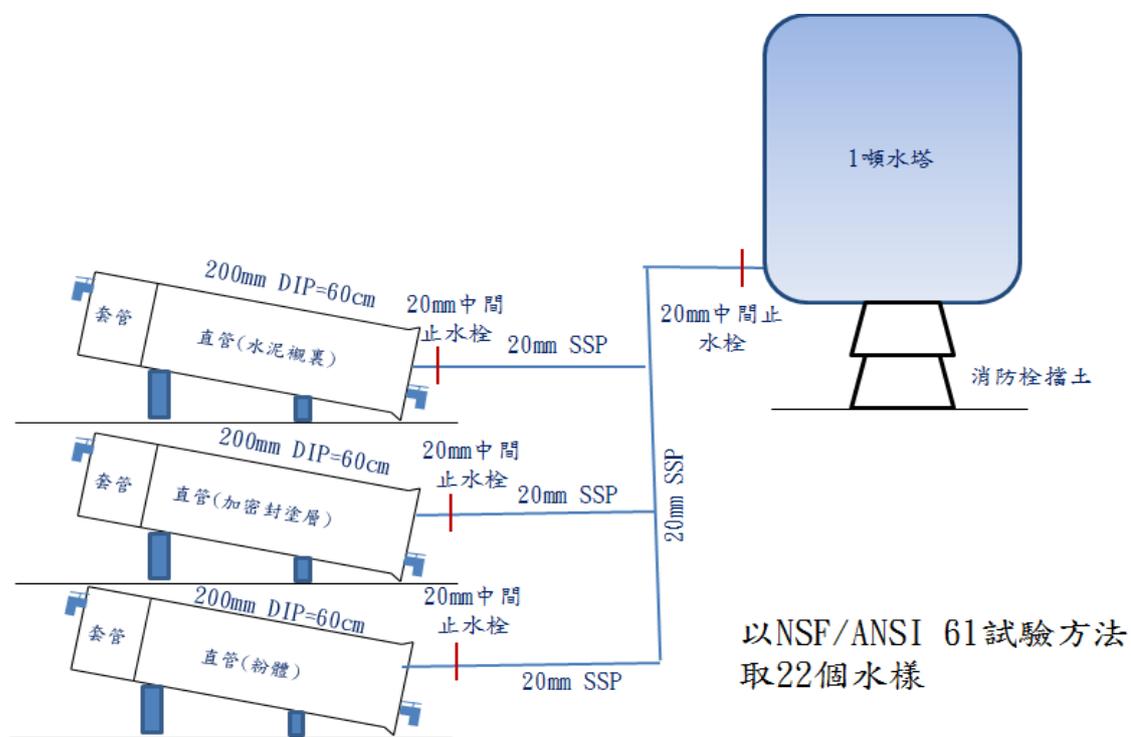


圖3-15 溶出試驗之試驗規劃圖

萃取試液製備：因目標物為有機物，故製備pH=8(含100ppm 硬度及0 ppm餘氯)之萃取試液，其製備方法如下：

1. 取 NaHCO_3 試藥 16.8公克，配置成2公升溶液。
2. 取 CaCl_2 試藥 22.2公克，配置成2公升溶液。
3. 將1、2兩溶液加入試液儲存筒，加水稀釋至200公升，即為pH 8萃取

試液。

4. 上揭萃取試液，於每次試驗時，均重新配製。



圖3-16 溶出試驗現場配置圖

3.2.3 試驗步驟

本試驗依NSF/ANSI 61管材溶出試驗程序，並採用多點萃取法，分別於3支DIP直管注滿萃取試液，於室溫放置 24 ± 1 小時，藉由取樣水龍頭以棕色玻璃瓶採集1公升萃取水樣，以備進行檢測分析(第1天)；再將管中賸餘萃取水充分排除後，重新注滿新配製的萃取試液，於室溫再放置 24 ± 1 小時後，以棕色玻璃瓶採集1公升萃取水樣分析(第2天)，再將管中賸餘萃取水排除後，重新注滿新配製的萃取試液，如圖3-17，重覆前步驟，於第4、8、10、15及19天取得萃取水樣分析。第3、7、9、14及18天萃取試液丟棄，程序如表3-1所示。

表3-1 DIP管材溶出試驗程序

日期	暴露時間	流逝時間	取 樣
11/6(一)		0d	於3支DIP管注滿萃取試液
11/7(二)	24±1h	1d	採集萃取水樣3支，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液；採集試液儲存筒水樣1支(空白)
11/8(三)	24±1h	2d	採集萃取水樣3支，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液
11/9(四)	24±1h	3d	排出萃取水丟棄後，重新注滿萃取試液
11/10(五)	24±1h	4d	採集萃取水樣3支(加品管2支)，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液
11/13(一)	72±1h	7d	排出萃取水丟棄後，重新注滿萃取試液
11/14(二)	24±1h	8d	採集萃取水樣3支後，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液
11/15(三)	24±1h	9d	排出萃取水丟棄後，重新注滿萃取試液
11/16(四)	24±1h	10d	採集萃取水樣3支(加品管2支)，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液
11/20(一)	96±1h	14d	排出萃取水丟棄後，重新注滿萃取試液
11/21(二)	24±1h	15d	採集萃取水樣3支，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液
11/24(五)	72±1h	18d	排出萃取水丟棄後，重新注滿萃取試液
11/25(六)	24±1h	19d	採集萃取水樣3支(加品管2支)，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液

*試驗年份為2017年，依NSF 61的試驗方法取樣，並將水樣於2017年11月27日送樣至中環科技股份有限公司進行檢驗。



圖3-17 注入萃取試液及取樣

3.2.4 試驗結果

溶出試驗萃取水樣經檢測，結果除# 2密封塗層管於流逝時間第1天及第2天檢出微量雙酚A外，其餘均未檢出，詳如表3-2及圖3-18。

表3-2 三種管材溶出試驗雙酚A檢測濃度

流逝時間(天)	# 1 粉體塗裝管	# 2密封塗層管	# 3水泥襯裡管
1	ND	0.00809	ND
2	ND	0.00387	ND
4	ND	ND	ND
8	ND	ND	ND
10	ND	ND	ND
15	ND	ND	ND
19	ND	ND	ND

註：”ND”表示低於方法偵測極限。

雙酚A檢測之方法偵測極限MDL=0.92 µg/L

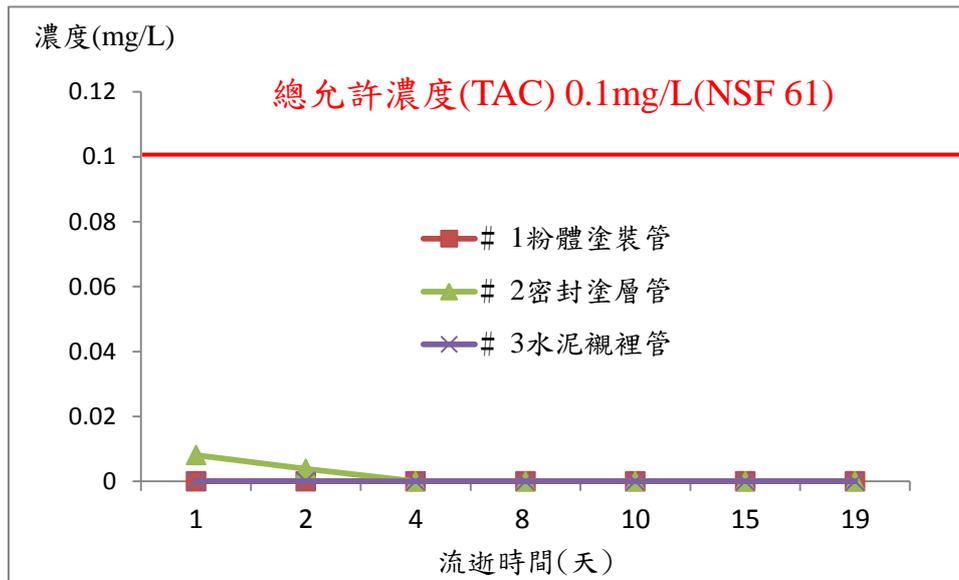


圖3-18 三種管材溶出試驗雙酚A檢測結果

1. 三種管材溶出試驗萃取水樣經檢測，結果除# 2 DIP環氧樹脂密封塗層管流逝時間第1天及第2天檢出微量雙酚A外，# 1 DIP環氧樹脂粉體塗裝管及# 3 DIP水泥襯裡管，雙酚A均未檢出。
2. 依NSF61 管材溶出試驗程序「多點萃取法」數據評估方法，以「正規化濃度」對「流逝時間」作成衰退曲線圖，取「流逝時間」第15天數據為Day1；以外差求得第105天數據，為Day90。 Day1數據不可超過「短期暴露值(STEL)」；Day90滯留(Statics)數據不可超過MCLs或「總允許濃度(TAC)」。經評估三種管材雙酚A溶出之健康風險如表3-3，Day1值均為ND(未檢出)，低於短期暴露值0.2 mg/L，Day90值亦均為ND(未檢出)，低於最大容許值0.1 mg/L，顯示三種管材雙酚A溶出，尚無健康風險疑慮。

表3-3 三種管材雙酚A溶出之健康風險評估

管材	Day1值 (mg/L)	短期暴露值 STEL(mg/L)	Day90值 (mg/L)	最大容許值 MCL(mg/L)
# 1粉體塗裝管	ND	0.2	ND	0.1
# 2密封塗層管	ND	0.2	ND	0.1
# 3水泥襯裡管	ND	0.2	ND	0.1

3.2.5 其他環氧樹脂可能溶出物探討

環氧樹脂主要原料為雙酚A、表氯醇，硬化劑及添加物，本研究已針對雙酚A以NSF 61的試驗方法檢驗無健康風險疑慮。建議未來可針對其他成份，如表氯醇、硬化劑及添加物等成份或雙酚A衍生物進行檢驗，可參考國內CNS 15274溶出試驗方法或NSF 61的試驗方法進行檢驗(表3-4)。

表3-4 各種標準檢項管制標準最大限值比較表

檢項	CNS 13273	CNS 15274	NSF/ANSI 61
1.濁度*	0.5	2	
2.色度*	1.0	5	
3.餘氯減量	0.7		
4.臭味及味道	無異常	無異常	
5.總有機碳		5.0	
6.酚類	0.005	0.005	0.2
7.氰化物	無檢出	0.01	0.02
8.表氯醇		0.01	0.004
9.胺類	無檢出	0.01	
10. 2,4- 甲苯二胺		0.002(二液型)	
11. 2,6- 甲苯二胺		0.001(二液型)	
12. 甲醛		0.08	0.1
13. 苯乙烯		0.002	0.01
14. 乙酸乙烯酯		0.01	0.002
15. 1,2-丁二烯		0.001	
16. 1,3-丁二烯		0.001	0.00002
17. 雙酚A			0.01
18. 雙酚A二環氧甘油醚			0.1
19. 丁酮			0.4
20. 甲基異丁酮			0.7

3.3 DIP管內部粉體塗裝品質之探討

近來北水處轄區內2個社區，自2017年8月底迄今已發生4起總表表前因粉體塗裝脫落，導致表前濾網堵塞而發生無水案件(圖3-19)，其實類似的案件在北水處時有所聞，研判與粉體塗裝品質不良有關，造成粉體與鑄鐵管面之黏結力(Adhesion)不足或粉體間之凝聚力(Cohesion)不足，而使粉體塗裝易於脫落。



圖3-19 粉體剝落堵塞水表

經檢視CNS 13273-G3254「延性鑄鐵管件及管件內面用環氧樹脂粉體塗裝」規範對於粉體物理性檢驗項目，大都無定量之粉體相關檢驗項目且判斷標準大都以目視做為判斷依據。為改善內襯粉體脫落之情形，建議自來水事業單位應於驗收項目增加可量化之粉體附著力項目，借此了解鑄鐵製造商交貨之粉體塗裝品質是否符合需求。本研究藉由拉拔試驗分析國內鑄鐵廠商粉體塗裝的品質程度，以協助提供採購規範修訂之參考。

3.3.1 粉體塗裝與液態塗裝介紹

1. 依日本延性鑄鐵管協會所出刊的「延性鑄鐵管內襯-環氧樹脂粉體塗裝」JCPA T 47所示，粉體塗料與液態塗料的塗膜形成過程如圖3-20：

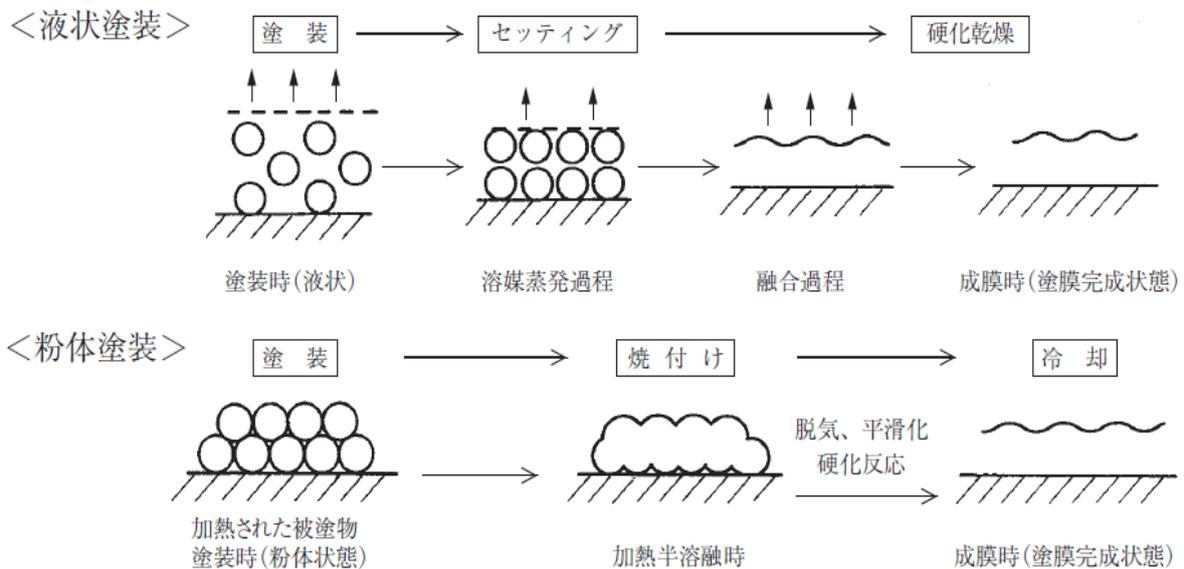


圖3-20 粉體塗料與液態塗料的塗膜形成過程⁷⁹

2. 環氧樹脂粉體塗料則由環氧樹脂、硬化劑，顏料，添加劑組成(不含溶劑)。粉體塗裝是透過加熱鑄鐵管壁，用熱能將粉體熔化、燒結再經硬化反應而形成塗膜。
3. 液體塗料是由樹脂、顏料、添加劑、溶劑組成，透過溶劑揮發再經融合過程而形成塗膜。液體塗料與粉體塗料兩者最大差異為粉體塗料是不含溶劑且塗裝過程需加熱融化。
4. JCPA T 47也指出，雙酚A和表氯醇合成的固體環氧樹脂曾遭厚生勞動省內質疑具有環境激素作用的物質。雙酚A的環境激素作用存在許多未知的問題，儘管還有許多問題沒有得出結論，日本延性鑄鐵管協會考慮安全問題，改採雙酚A和環氧氯丙烷合成的固體環氧樹脂。

5. 環氧樹脂粉體塗料具有以下特點：

(1)不含有機溶劑：塗料製造因不含有機溶劑，不會造成環境污染及製造出有害物質。塗裝過程不會因有機溶劑揮發對塗膜產生的不良影響(外觀及塗膜性能)。

(2)使用高分子量樹脂：因為沒有有機溶劑的溶解度的問題，因此可以使用高分子量的環氧樹脂，如此可以確保環氧樹脂具有優異的塗膜性能。

(3)容易製作厚塗層：粉體熔化時的熔融粘度很高，對鑄鐵面具優異的附著性，塗層厚度自然容易塗厚。



(4)優秀的塗裝作業性：粉體成品是顆粒細小的粉狀(圖3-21)，製程可結合自動化噴漆提高生產效率。

圖 3-21 環氧樹脂粉體塗料

6. 常見的粉體塗裝方法：

(1)旋轉噴塗法：將鑄鐵管加熱至(160~230°C)，用氣動輸送環氧樹脂粉體塗料，並將其噴塗在旋轉的鑄鐵管上，粉體熔化而形成塗膜，這種方法主要用於直管(圖3-22)。

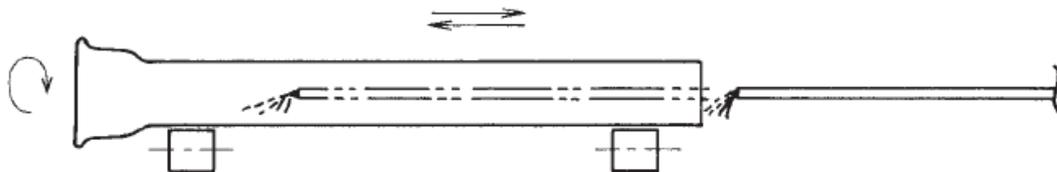


圖3-22 旋轉噴塗法⁷⁹

(2)靜電塗裝方法：把粉體塗料送到噴槍之噴嘴尖端，以高壓(40-80 kV)電離使粉體帶負電荷，預熱鑄鐵管讓管壁帶正電，以靜電力(庫倫力)方式讓粉體附著在管壁上，粉體熔化而形成塗膜，這種方法主要用於管件(圖3-23)。

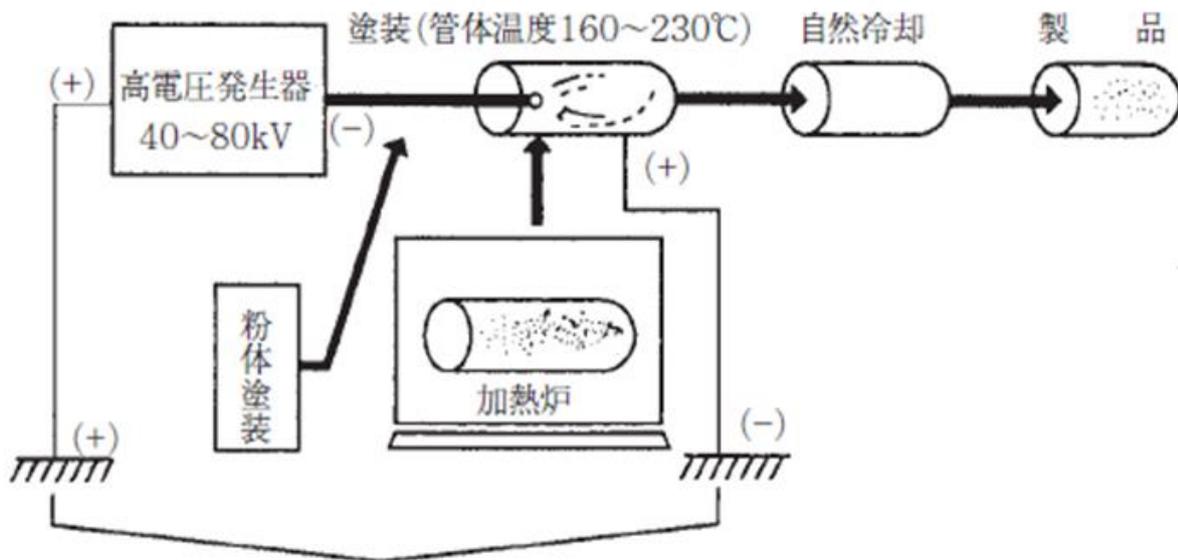


圖3-23 靜電塗裝法⁷⁹

(3)流體浸漬法：將管預熱並浸入環氧樹脂粉體塗料的流動浸漬槽，待粉體與管壁融合，再加溫烘烤。

(4)噴塗法：粉末塗料在噴槍尖端先被火焰熔化，再噴塗至被預熱之物體面，由於此種噴塗方法，塗膜的品質教不穩定，已逐漸少用。

7. 粉體內襯的製作流程(圖3-24)相較水泥砂漿襯裡，更需注重表面的處理及加熱溫度。而粉體的黏結力與凝聚力要佳，最關鍵的步驟在管內研磨、清潔、鑄鐵加熱、粉體塗裝、保溫(粉體燒結)。



圖3-24 粉體內襯的製作流程

8. 環氧樹脂粉體塗裝的優點：

- (1)塗層表面均勻光滑不結垢，水質不會被水中微生物污染，鑄管不會氧化生鏽，磨擦阻力小能增加管內流量及流速，並穩定水質中pH值、濁度及抑制異味產生。
- (2)塗層具有優越韌性及附著強度，可耐長期水流沖刷不產生剝離。
- (3)使用無溶劑型塗料，不會釋出有毒物質影響飲用水品質，較符合飲用水之標準。

3.3.2 研究方法

本研究依循ASTM D 4541(Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers)⁸⁰之TYPE III儀器進行試驗。

1. 拉拔器及配件介紹(圖3-25)：

- (1) 拉拔器：採ASTM D4541 介紹之TYPE III儀器，由英國Elcometer公司生產之108型之油壓式黏結力拉拔測試器 (Hydraulic Adhesion Tester)。此拉拔器可自動對心(Self-Alignment)能避免非正向施拉造成試驗數據之誤差，容許拉力範圍0至25MPa，儀器誤差±3% or

60psi(0.41MPa) (兩者取大值) ，拉力速度在1 MPa/s 以下。

- (2) 端子(dolly)：拉拔器的測試探頭，外徑19.4 mm，內徑3.7 mm，截面積2.84 mm²。
- (3) 黏膠：採3M Scotch-Wild MC 1500，最低拉力強度20MPa，工作溫度-50至80 °C，塗膠厚度要小於0.2mm。黏膠應放置陰涼乾燥且避免陽光直射之處保存，保存期限為12個月。(黏膠的選用應採拉力強度大於塗層的凝聚力與塗層間的黏結力之黏膠)
- (4) 切環器(dolly cutter)：用來環切刮除塗層表面之器具，使塗層成為獨立的圓形區塊。



圖3-25 拉拔器及配件圖

2. 試驗管材的選擇

- (1) 直管採DIP K型與NS型之粉體塗裝管材：

選200mm DIP K型粉體直管1支，該管材是2016年向興南鑄造廠股份有限公司採購。另選200mm DIP NS型粉體直管1支(1公尺)，該管是2017年向日本之栗本公司採購。

- (2) 管件採DIP K型與NS型之粉體塗裝管材：

選用北水處直潭倉庫既有管材，試驗進行時有國內兩家鑄鐵管廠商

(廠商A、B)可供選擇。管徑涵蓋150mm、200mm、300mm及400mm，管種分彎管、大小頭、套筒、短管甲、短管乙及三通管(聯絡用、消防用)(詳表3-5)。選料過程儘量挑選直潭倉庫較新且粉體表面較完整之管材進行拉拔試驗。另選2017年向日本之栗本公司採購之200x22.5彎頭1只。

3. 管材之切割

拉拔試驗前將待測管材剖半切割(圖3-26)，以利拉拔試驗過程(表面處理、黏膠、環切、端子除膠及拉拔器操作)將不受管內拘限空間而阻礙試驗進行，拉拔試驗之選點範圍也更佳廣泛且能獲得更正確的拉拔強度數據。



管內不利進行拉拔試驗



切割機剖半待測管



待測管剖半後試驗空間不受限



內襯表面清潔與排放

圖3-26 待測管材剖半切割

表3-5 直潭倉庫取得之管件表

材料編號	材料名稱	規格	單位	A廠商		B廠商	
				數量	年份	數量	年份
DB41-06001-C	延性螺壓式承插彎管	150mmx11.25	只	1	2016	1	2016
DB41-06002-C	延性螺壓式承插彎管	150mmx22.5	只	1	2017	0	-
DB41-06004-C	延性螺壓式承插彎管	150mmx45	只	1	2017	0	-
DB41-06009-C	延性螺壓式承插彎管	150mmx90	只	1	2017	0	-
DB41-08001-C	延性螺壓式承插彎管	200mmx11.25	只	1	2016	1	2016
DB41-08002-C	延性螺壓式承插彎管	200mmx22.5	只	1	2016	1	2016
DB41-08004-C	延性螺壓式承插彎管	200mmx45	只	1	2016	1	2016
DB41-08009-C	延性螺壓式承插彎管	200mmx90	只	1	2016	0	-
DB41-12001-C	延性螺壓式承插彎管	300mmx11.25	只	0	-	1	2016
DB41-12002-C	延性螺壓式承插彎管	300mmx22.5	只	1	2016	1	2014
DB41-12004-C	延性螺壓式承插彎管	300mmx45	只	1	2015	1	2016
DB41-12009-C	延性螺壓式承插彎管	300mmx90	只	1	2017	0	-
DB41-16001-C	延性螺壓式承插彎管	400mmx11.25	只	0	-	1	2012
DB41-16002-C	延性螺壓式承插彎管	400mmx22.5	只	1	2017	0	-
DB41-16004-C	延性螺壓式承插彎管	400mmx45	只	1	2017	0	-
DR41-0604-C	延性螺壓式承插大小頭	150mmx100mm	只	1	2017	0	-
DR41-0806-C	延性螺壓式承插大小頭	200mmx150mm	只	1	2016	1	2016
DS20-0670-C	延性螺壓式單突緣短管	150mm	只	1	2016	0	-
DS20-0870-C	延性螺壓式單突緣短管	200mm	只	1	2016	1	2016
DS40-0600-C	延性螺壓式雙承口套筒	150mm	只	1	2017	0	-
DS40-0800-C	延性螺壓式雙承口套筒	200mm	只	1	2017	0	-
DS40-0612-C	延性螺壓式單承口單突緣短管	150mm	只	1	2017	0	-
DS40-0812-C	延性螺壓式單承口單突緣短管	200mm	只	1	2016	1	2016
DT40-0600-C	延性螺壓式雙承口三通管	150mmx150mm	只	1	2017	0	-
DT40-0604-C	延性螺壓式雙承口三通管	150mmx100mm	只	0	-	1	2016
DT40-0800-C	延性螺壓式雙承口三通管	200mmx200mm	只	1	2015	1	2016
DT40-0804-C	延性螺壓式雙承口三通管	200mmx100mm	只	1	2016	1	2016
DT40-0806-C	延性螺壓式雙承口三通管	200mmx150mm	只	1	2016	1	2016
DT73-0603-C	延性螺壓式單承口單突緣三通管	150mmx75mm	只	1	2017	0	-
DT73-0803-C	延性螺壓式單承口單突緣三通管	200mmx75mm	只	1	2016	1	2016

3.3.3 拉拔試驗步驟

拉拔試驗程序分為表面處理、黏膠、環切、端子除膠及拉拔器測試等過程，每個階段都有應注意事項，稍有不慎都將減損拉拔強度，故試驗過程應注意每個細節才可以測得較真實的塗層拉拔強度，拉拔試驗主要步驟如下（圖3-27）。

1. 表面處理：以細砂紙輕磨待測面表面，確保待測面清潔，乾燥，無油

脂，並使待測面產生些微粗糙，可增進黏結效果。惟不能過度研磨而損傷待測面表面塗層；另端子的表面亦要將前次試驗殘膠清潔乾淨，並用細砂紙輕磨端子面。

2. 黏膠：黏膠前將端子插銷(Dolly plug)放置端子中心。端子插銷放置目的在防止黏貼端子與待測面過程時，避免黏膠由內部孔徑上升到端子內面。若有黏膠由內部孔徑上升，將阻礙拉拔器針頭由端子內碰觸待測面，拉拔器套筒自然無法卡住端子周圍凹槽，將導致拉拔試驗無法進行。黏膠應少量且均勻塗布在端子面，膠黏厚度不可太厚，於凝固初期建議施加重物於端子面上。
3. 粉體表面環切：待黏膠完全硬化後，使用切環器將端子周遭的塗層括除，形成孤立的區塊，括除過程需謹慎處理不可碰觸端子，以免影響拉拔強度。(環切的過程可能於黏結介面產生微裂紋，而影響黏結效果)
4. 操作拉拔器讀取拉拔強度：
 - (1) 逆時針轉動拉拔器轉動把手至壓力完全釋放。
 - (2) 將拉拔器套筒套向端子使金屬探針栓插入端子的正中央。
 - (3) 拉起拉拔器連接套筒使拉拔器與端子緊密連接。如果套筒無法與端子緊密接合，則須使用端子工具去除端子內的殘膠，去除過程應小心處理勿傷及端子，避免影響拉拔強度。
 - (4) 順時針緩慢轉動拉拔器轉動把手，緩慢施拉(不可快速旋轉把手而影響拉拔數值，拉力速度在1 MPa/s 以下，並於100秒內結束)使端子脫離待測面，此時表頭的讀數即為拉拔強度。



圖3-27 拉拔試驗步驟

5. 試驗數據紀錄：

依ASTM D 4541規範規定，試驗數據應紀錄拉拔強度與破壞情形描述。拉拔強度即直接讀拉拔器的表頭值；而破壞情形描述則紀錄端子面與待測面之塗層所佔之比例，以下說明破壞情形描述方式(圖3-28)：

- (1) 標示塗層本身間的剝離以A、B、C...等表示，及塗層所佔之比例，試片底層標為A，隨後各塗層標為B、C、D 等，黏膠為Y，端子為Z。
- (2) 標示塗層與塗層間的剝離以A/B，B/C，C/D...等表示，及塗層所佔之比例。

以下圖為例，破壞面由C層塗層凝聚力破壞(Cohesion)與C層及D層粘結力破壞(Adhesion)佔比各50%，ASTM的紀錄方式為C50%，C/D 50%。

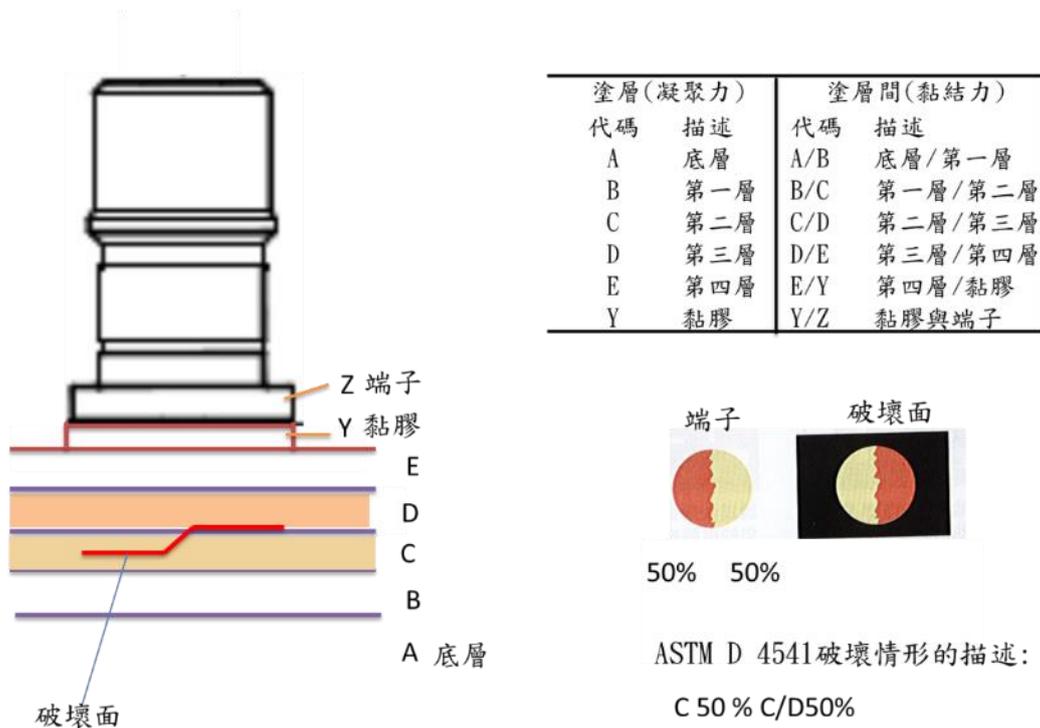


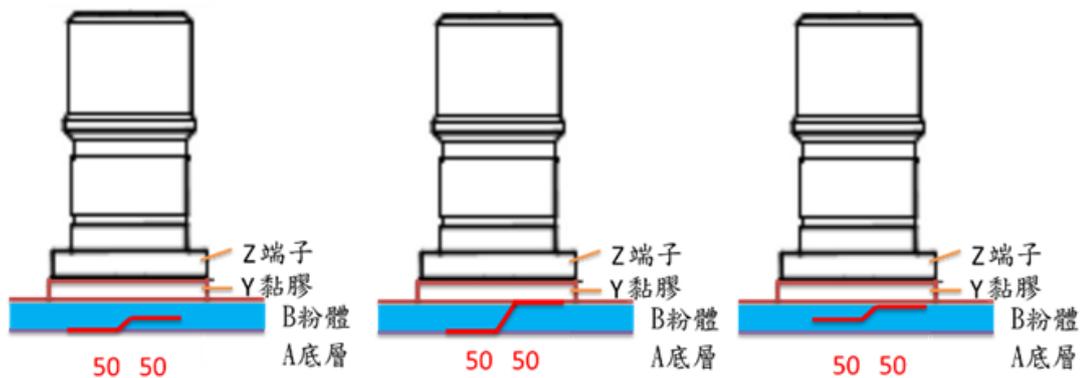
圖3-28 多層塗裝的破壞情形描述

ASTM 對破壞情形的描述是很詳盡的，但對於DIP環氧樹脂粉體內襯管僅是1層粉體塗層而言，這樣的描述就會顯得太複雜。本研究案將描述方式予以簡化，如圖3-29所示上方描述是ASTM的，以下是簡化後的描述，大致上粉體管破壞種類(模式)分為4種，分述如下：

1. 鑄鐵面破壞(Adhesion Failure)：破壞在鑄鐵與粉體之交界(A/B面有發生即算，A底層不可能被拉壞)，代表粉體與鑄鐵面有分離情形發生，鑄鐵面有裸露出來，未來極有可能發生大面積粉體剝落的情形，是較不被允許發生的破壞行為。
2. 粉體破壞(Coating Failure\ Cohesion Failure)是破壞在粉體層(B層)，鑄鐵面未裸露(A/B 0%)，若無粉體原料品質疑慮，此種破壞模式拉拔強度普遍強度都很高。
3. 黏膠破壞(No Failure\glue Failure)，是破壞在黏膠面(Y/Z面或Y層及Y/Z面)，當黏膠佔比過大時，試驗所得拉拔強度無法代表粉體塗裝之

品值，原則應改予排除。依ASTM D4541規定，當黏膠面占端子面大於75%時，判定黏膠失敗。黏膠失敗發生的因有兩種：第一種是黏膠強度未發展至應有強度下之破壞，此時拉拔強度偏低，發生原因可能為表面未處理妥善、環切時碰觸端子，黏膠未硬化..等。第二種是黏膠強度比粉體凝聚力及黏結力小造成(並非沒黏好)，此時拉拔強度相對較高，此拉拔數據若大於允收標準得判定是有效數據。

4. 拉拔器轉到底卻沒損壞(Could not pull off)，此情形發生於拉拔器拉到極值時端子仍未脫落，端子仍屹立不搖的站在塗層上。



底層/粉體，50% 粉體50% 底層/粉體 50%，粉體/膠面50% 粉體 50%，粉體/膠面50%

鑄鐵面破壞50%

鑄鐵面破壞50%

粉體破壞50%

ASTM D 4541描述	簡化描述
N%鑄鐵，M%鑄鐵與粉體	鑄鐵面破壞，鑄鐵裸露T%
N%粉體，M%粉體與黏膠	粉體破壞，粉體裸露T%
N%黏膠，M%黏膠與端子	黏膠破壞

圖3-29 單層粉體的破壞情形描述

3.3.4 拉拔強度試驗結果

本試驗共建立直管46筆，管件303筆拉拔試驗數據，以拉拔強度及破壞模式分別進行直管與管件的數據分析。

1. 興南公司與栗本公司(日本)粉體直管拉拔強度比較：

興南公司所生產的粉體直管，經拉拔試驗40筆數據發現(表3-6)，無鑄鐵面破壞，19筆粉體破壞(平均拉拔強度17.50 MPa)；21筆黏膠破壞(平均拉拔強度20.65 MPa)。由40筆數據皆無出現鑄鐵面破壞，其中有19筆粉體破壞，代表粉體與鑄鐵的黏結強度比粉體與黏膠的黏結力及粉體的凝聚力更強((A/B)> (B/Y)及(B))，推測生產過程鑄鐵表面的研磨、清潔及鑄鐵管加熱都有做到良好品質控管，才能使粉體充分融化後牢固黏結於鑄鐵上。

栗本公司所生產的粉體直管，經拉拔試驗6筆數據發現(表3-6)，無鑄鐵面破壞及粉體破壞，全部為黏膠破壞(平均拉拔強度23.82 MPa)。代表各層強度以黏膠強度是最弱(黏膠強度不足)，所得之強度不能實際代表粉體附着力，若黏膠強度夠強，實際拉拔強度應該更高。

表3-6 興南與栗本平均拉拔強度及破壞模式比較表

口徑	廠商	興南(40筆數據)			栗本(6筆數據)		
	破壞模式	鑄鐵面破壞	粉體破壞	黏膠破壞	鑄鐵面破壞	粉體破壞	黏膠破壞
200	發生次數(比例%)	0	19 47.5%	21 52.5%	0	0	6 100%
	平均拉拔強度(MPa)	-	17.5	20.65	-	-	23.82
全部平均拉拔強度(MPa)		18.99			23.82		

興南公司所製造之粉體直管雖然不比栗本公司生產優異，但由試驗數據得知粉體塗裝品質良好，製造過程表面清潔與管壁加熱溫度都足夠，使得粉體咬合鑄鐵面的黏結力大於粉體本身的凝聚力。再由兩家公司粉體塗裝的破壞模式及拉拔強度觀之(圖3-30)，因栗本的破壞模式皆為黏膠破壞，推測兩家公司拉拔強度的差異來自於粉體的塗裝技術。

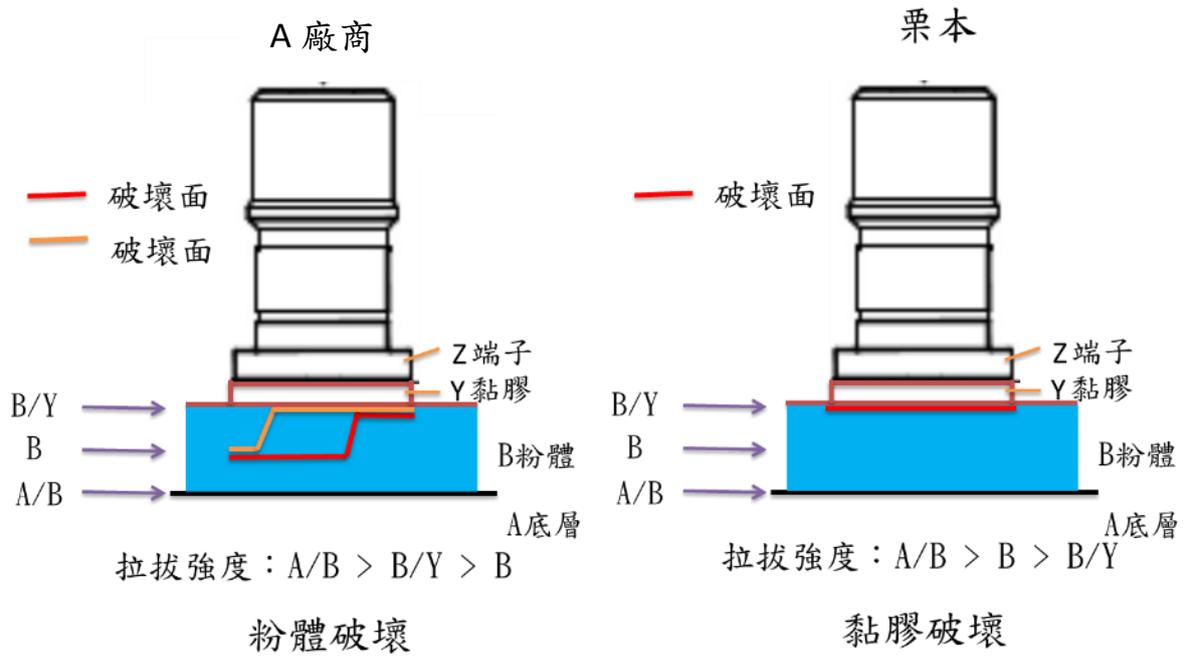


圖3-30 興南與栗本破壞模式及強度關係

2. 國內廠商A、B及栗本(日本)粉體管件品質比較：

國內A、B廠商與日本栗本公司各口徑的平均拉拔強度與破壞模式，如表3-7所示，廠商A與B的平均拉拔強度都出現隨口徑變大而有強度降低的情形，推測應與表面處理有關，口徑越大之管材須研磨之表面積自然較大，研磨時間較長，若未能投入更多人力與時間，粉體的附著力自然較差。

廠商A，口徑150mm至400mm鑄鐵面破壞占比達97.50%以上(175點)，150 mm口徑出現粉體破壞有1點，拉拔強度為14.3 MPa明顯高於鑄鐵面破壞之拉拔強度，該管件為單承口單突緣短管。200 mm口徑出現粉體破壞有2點，平均拉拔強度高達19.93 MPa，明顯高於鑄鐵面破壞之拉拔強度，該管件為套管。發生粉體破壞的點都位於非彎管之管件，顯示出彎管的粉體塗裝品質較差。廠商A若能確實做好鑄鐵表面處理，即能避免發生鑄鐵面破壞模式，拉拔強度自然可以提升許多。

廠商B，口徑150mm鑄鐵面破壞的占比為93.75%(15點)，出現粉體破壞

有1點，拉拔強度為20.41 MPa明顯高於鑄鐵面破壞之拉拔強度，該管件為150x100三通管。200mm鑄鐵面破壞的占比為78.38%(58點)，出現14點粉體破壞，惟平均拉拔強度僅有9.35 MPa強度不如鑄鐵面破壞的平均拉拔強度11.38 MPa，這代表破壞在粉體層，推測其塗裝過程加溫不足導致粉體凝聚力無法完全發揮。300mm鑄鐵面破壞的占比為65.22%(18點)，出現6點粉體破壞，惟平均拉拔強度僅有9.51 MPa強度還不如鑄鐵面破壞的平均拉拔強度10.4 MPa，造成原因與200mm口徑相同。400mm鑄鐵面破壞的占比為100%(8點)平均拉拔強度8.95 MPa。

表3-7 廠商A、B與栗本平均拉拔強度及破壞模式比較表

口徑	廠商	廠商A(178筆數據)			廠商B(121筆數據)			栗本(4筆數據)		
	破壞模式	鑄鐵面破壞	粉體破壞	黏膠破壞	鑄鐵面破壞	粉體破壞	黏膠破壞	鑄鐵面破壞	粉體破壞	黏膠破壞
150	發生次數 (比例%)	59 98.33%	1 1.67%	0	15 93.75%	1 6.25%	0	-	-	-
	平均拉拔強度(MPa)	11.34	14.3	-	15.9	20.41	-	-	-	-
200	發生次數 (比例%)	78 97.50%	2 2.5%	0	58 78.38%	14 18.92%	2 2.70%	0	0	4 100%
	平均拉拔強度(MPa)	11.17	19.93	-	11.38	9.35	4.41	-	-	21.22
300	發生次數 (比例%)	23 100%	0	0	15 65.22%	6 26.08%	2 8.70%	-	-	-
	平均拉拔強度(MPa)	6.5	-	-	10.4	9.51	6.79	-	-	-
400	發生次數 (比例%)	15 100%	0	0	8 100%	0	-	-	-	-
	平均拉拔強度(MPa)	7.97	-	-	8.95	-	-	-	-	-
全部平均拉拔強度(MPa)		10.48			11.21			21.22		

由表3-7及圖3-31所示，廠商A、B管件都以鑄鐵面破壞為大宗，表示鑄鐵表面的研磨、清潔、鑄鐵管加熱都沒做好，應該要加強生產品質，才讓粉體融化過程無法咬合鑄鐵管面。另外廠商B發生拉拔強度低的粉體破壞，推測可能為粉體原料品質問題或粉體燒結不確實所造成，使粉體的凝聚力無法有效發揮，國內鑄鐵廠商的管件粉體塗裝須提升的製程如圖3-32。

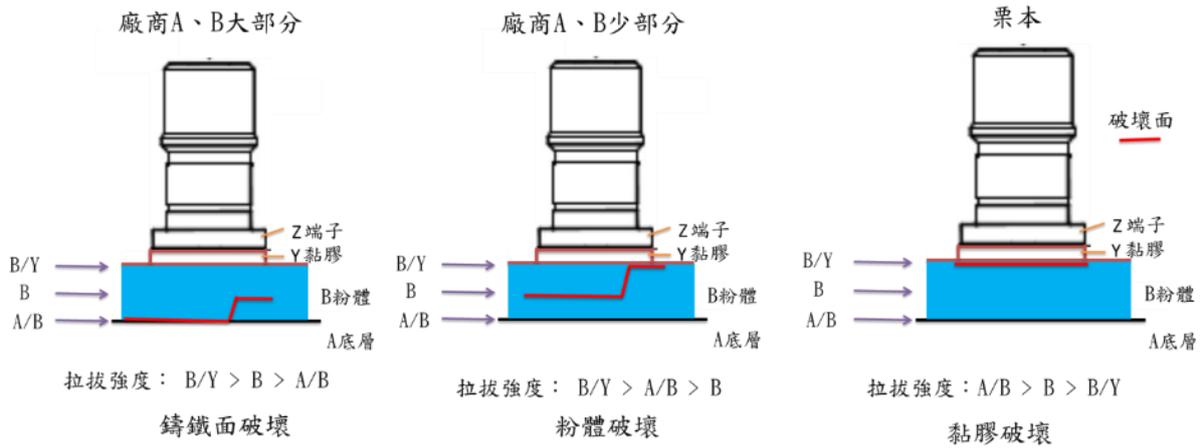


圖3-31 破壞模式及強度關係



圖3-32 國內鑄鐵廠商管件粉體塗裝須提升的製程

再看栗本公司的200x22.5的彎管，都是出現黏膠破壞，平均拉拔強度高達21.22 MPa，相較之下顯示出國內粉體管件製造品質低落。栗本公司的管件粉體強度與直管同樣屬高品質且差異度不大，這也是為何日本的粉體管埋在地底下可以20幾年粉體都無損壞的原因(圖3-33)。

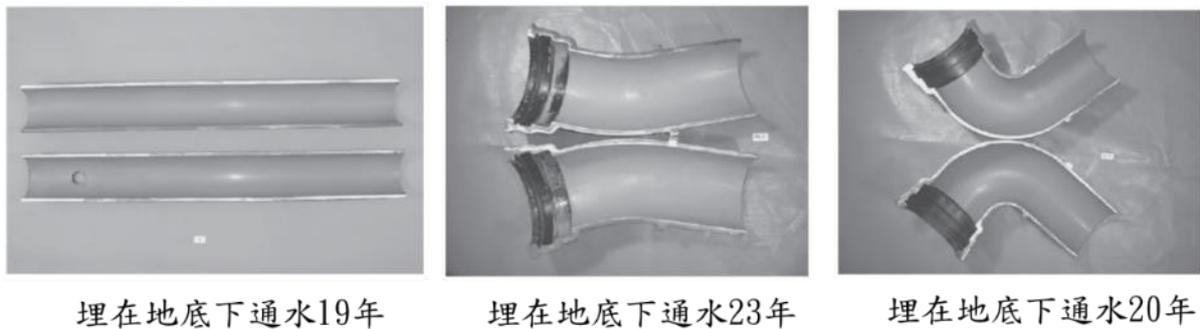


圖3-33 日本粉體內襯管通水後之內襯狀況

綜合上述的試驗發現，破壞模式對於品質管理與材料驗收十分重要，拉拔試驗的結果就可知道廠商哪個環節沒做好，以粉體塗裝鑄鐵管而言，只有一層塗料相對好判斷。如果是斷在粉體內(Cohesive Failure)，而且強度太低，則可判斷廠商於粉體燒結過程沒有持續提供足夠溫度，使環氧樹脂與硬化劑粉末沒有充分融化、產生鍵結，強度生成不夠，或者是粉末供應商的粉料配方有問題，即便加熱足夠，卻不能生成足夠的強度，才導致拉拔試驗的弱點都斷在粉體內。

若非粉體層破壞，卻都是粉體與鑄鐵管壁分離(Adhesive Failure)的態樣，而且強度太低，則顯示廠商疏於清潔鑄鐵內部，表面油污、鏽斑沒有去除，甚至也沒有對管壁內噴砂製造細微的粗糙面，即進行粉體噴塗，粉體塗料熔化過程無法與管壁發揮黏結力，形成粉體附著不住內壁的弱點。

3.4 小結

北水處的配水管採用DIP超過30年，直管均採水泥內襯、管件為粉體塗裝內襯，已經行之有年，雖然第一線的人員認為上述內襯或多或少會對管網的水質帶來一些影響，但缺乏量化的數據佐證，不易提出改進建議。經過本研究的大量實驗數據、數值模型分析，可得到以下結論：

1.水泥內襯：內襯以離心法澆鑄易形成材料分離情形，比重大的砂質被甩到鑄鐵面，表層留下輕質的水泥乳，如果沒有磨掉這層鹼性物質，埋管通水後吐鹼的反應很快，水理模型數值模擬發現管末端埋設新管的TDS濃度明顯超標。若預先磨掉表層水泥乳的內襯，其吐鹼反應係數下降為一半左右，管末TDS也不易超標。但用水少的末端或高地管線，即便內襯吐鹼的濃度不超標，卻也會連續多年維持在高濃度，除非改用非水泥內襯。

本研究TDS溶出及擴散係以北水處的自來水進行研究，因為臺北的背景TDS僅55ppm，相對較低、硬度小，LSI介於-1~-2，水的侵蝕性高，因此溶

出反應較明顯，K值較大，相較於臺灣其他硬度較高、侵蝕性較低的自來水，本研究可視為溶出較明顯的上限值，數據引用上須留意。

2.管壁自潔淨：以一個中區當作樣本進行水理分析，發現約85%的管段流速低於0.3m/s，流速過慢無法自我潔淨，底部積泥只會逐漸沉降增厚、管壁生物膜生長旺盛。這些管段可定義為「水質敏感區」，當操作閘栓或停復水時，容易揚起底泥、刮下管壁生物膜導致水污染，必須定時進行人工排水方能清除。建議未來管線汰換之際，應以流速作為設計校核，以避免Over-designed口徑過大，導致流速過慢，形成廣大的水質敏感區。

3.加密封塗層：此一內襯係於水泥內襯再塗上無揮發溶劑型的液態環氧樹脂，硬化後以隔離水接觸水泥，避免吐鹼影響水質。然而經過試驗，發現初期仍有微量的雙酚A釋出，約介於4~8 $\mu\text{g/L}$ ，雖然未超過NSF61之總允許濃度(TAC)0.1mg/L，但相較於兩組比對試驗：粉體塗裝、水泥內襯的零檢出，加密封塗層仍有使用上的些微疑慮。

4.粉體塗裝：北水處的DIP管件(彎頭、套管、丁字管...)長年均使用水藍色的粉體塗裝，但經常於拆裝水表時，發現水表濾網塞滿藍色的粉體碎片，代表管件的粉體塗裝附著力不足，易隨水流剝離四散。經本研究以ASTM D4541試驗規範進行塗層拉拔，管件試驗299次，平均強度僅10.78 MPa，其中約九成拉拔斷裂於粉體與鑄鐵的附著面上，明顯管件的手工製程沒有注意到鑄鐵面的清潔除鏽，就噴上粉末逕行熱熔，才導致附著力低落。直管試驗40次，強度則高達18.99 MPa，拉拔時皆無鑄鐵附著面的粉體剝離，係因直管的粉體內襯採全自動機械生產，鑄鐵內面清潔除鏽確實，粉體附著力得以完整發揮。因此建議未來應針對DIP內襯定訂允收之拉拔標準強度，以驅使廠商提升粉體內襯品質。

第四章 配水管施工之管材需求探討

4.1 施工常見問題分析

臺灣地區地質狀況不佳，全島大小斷層遍佈，一旦發生大地震，若對民眾賴以維生的自來水系統造成破壞，震後常無法迅速恢復正常，而需長期進行檢查與復舊，目前台灣地區都會區人口已達總人口數的70%以上，由於都市人口集中化，災後對社經、居民身心之影響等生活衝擊甚鉅，1999年9月21日集集大地震(M=7.3)、2016年2月6日美濃地震(M=6.6)及2018年2月6日花蓮地震(M=6.2)對於台灣中部、臺南及花蓮地區自來水供水系統造成的損壞及衝擊相當嚴重(圖4-1)，造成民眾於地震恐懼之餘，仍須面對缺水之苦就是一個最明顯的例子。



圖4-1 地震後輸水幹管受損情形及沿主要道路鋪設的明管

2002年9月11日都市防救災研究會中，即針對集集大地震後，自來水供水系統的災後檢討提出三大項結論，分別為：一、加強供水系統之耐震能力以減少地震破壞；二、震後緊急供水及供水系統搶救措施；三、廣設備用水源與加強水資源管理以降低缺水風險。其中，就第一大項提出的防震策略即為

(1)提升管線接頭耐震等級

(2)加強管材耐震能力並規劃小區域管網系統以降低停水風險。

1995年1月17日日本兵庫縣阪神大地震(M=7.2),造成自來水供水系統嚴重受損,消防用水不足、緊急救援及醫護用水不足、供水設施嚴重破壞無法供水、淨水廠處理機能喪失等狀況。然而神戶水道局於地震前,汰換更新了90%的配水管,並在臨海地區及高填土地區採用防脫型耐震接頭,結果配水管線並無損壞,如此可直接印證耐震接頭的耐震能力。因此日本在阪神大地震過後辦理管線汰換時即全面採用耐震接頭(NS型),截至目前為止全日本耐震接頭(NS型)之比例約為11%,日本東京都配水管中更有約30%已為耐震接頭(NS型),其後日本隨著地震所造成之管線損害日趨嚴重,因此積極研發及應用許多耐震型接頭,包括S(Seismic)型、NS(New Seismic)型及更進化至所謂次世代之GX(GeneX)型

隨著都市的成長發展,於道路下方佈設各類管線設施物,如五大民生管線:電信、電力、自來水、瓦斯與第四台,以及排水側溝、雨水箱涵、污水下水道等,此皆為提供民眾生活安全與便利性,然道路空間有限,且必然於路口產生交錯情形,因各種不同管線相互疊壓,造成北水處於辦理管線汰換時,需以各式固定彎頭進行改接連通,施工效率低且因接頭數過多,日後恐增加漏水機率,甚至某些路段因障礙物因素無法施工,影響管線汰換成效。

4.2 耐震NS接頭試辦

有鑑於臺灣的地理環境及條件與日本相似,而臺北市又位於軟弱土層之臺北盆地,地震所造成之盆地震度放大效應更易造成埋設其中之自來水管線系統遭受直接損壞,為打造一張不缺水的保單,北處從根本作起,除全面建立供水備載備援系統,更著手加強國內自來水管線的耐震能力,現有給水管除已比照日本東京都全面採用符合耐震之不銹鋼波狀管外,配水

管材亦與日本同樣採用延性鑄鐵管，惟配水管材的耐震能力主要取決於接頭伸縮量、可撓角及抗拉脫力，國內延性鑄鐵管所普遍採用之接頭型式(K型)，防脫功能不良，因此僅能承受一般中、小規模地震，面對日益頻繁之大規模地震，耐震性能恐有不足。

由於日本各主要自來水經營事業體已逐漸將傳統柔性接頭之延性鑄鐵管材進化至新一代之耐震管材(S、NS型)，其中東京都水道局自2011年起開始實施「管路耐震提升10年計畫」，計畫於十年內，將大量老舊管線汰換為耐震管材，屆時整體東京都供水管網之耐震管材使用比例將從2011年的32%大幅躍進至2021年的54%，因此北水處自2011年即引進日本先進自來水事業體給、配水管耐震管材及施工技術，開辦3日的種子人員教育訓練，經由日本專家實際教導，達到種子效果，作為北水處未來全面推動採用耐震管材的最佳助手。

由於耐震接頭(NS型)具有防脫功能，在日本已廣泛使用，其產品及技術並已日趨成熟，耐震性能亦與GX型同等級，且專利期已過，是最適合引進國內之耐震管材。另隨著新液化潛勢區之公布及山腳斷層可能潛在威脅，臺北市為首善之都，更應提升自來水管線之耐震能力，然而耐震接頭(NS型)與北水處現行K型接頭在設計、施工機具、施工方法及材料等皆截然不同，為使後續能順利引進推廣延性鑄鐵管耐震接頭(NS型)，以降低自來水管線地震災害，且不致發生水土不符，甚而發展出符合國內社會環境的施工方法及機具，故辦理本試辦工程案。

4.2.1 耐震接頭(NS型)簡介

NS型是於耐震接頭前加上N字，有新開發(NEW)之意。其標示及接合方式如圖4-2~圖4-4，NS型延性鑄鐵管(簡稱：NS型)其管種有直管(D1、D3)及異型管(雙承口套筒、彎管、丁字管、大小頭及短管)，其伸縮性能為

$\pm 0.01L(m)$ 、 L =管長度，防脫性能為 $0.3D(t)$ 、 D =管徑。

NS型直管具有伸縮及防脫功能，其接合配件分別為橡膠圈(圖4-5)、防脫環定心橡膠圈和防脫環(圖4-6-圖4-7)3種，防脫環為防止接頭脫離之配件，防脫環定心橡膠圈是將防脫環固定於管中心之配件。(防脫環定心橡膠圈及防脫環於出貨時已裝置完成)。

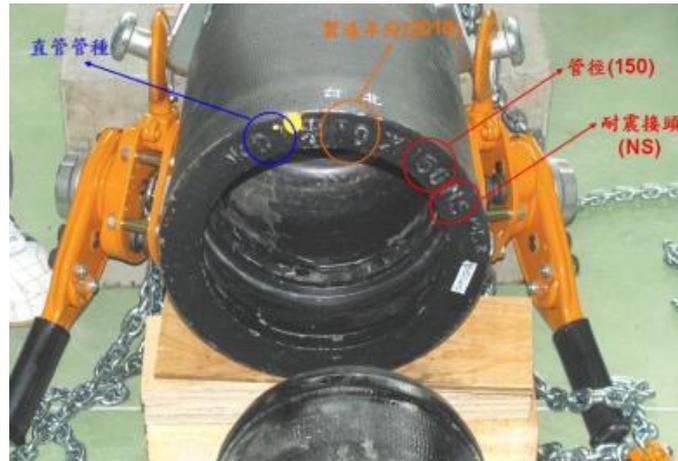


圖4-2 NS型延性鑄鐵管標示方式圖

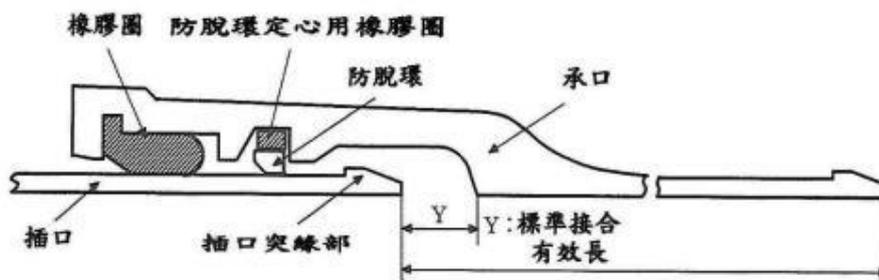


圖4-3 NS型承口伸縮型(直管)接合示意圖



圖4-4 NS型承口伸縮型(直管)接合完成圖



圖4-5 NS型耐震接頭橡膠圈



圖4-6 NS型耐震接頭防脫環定心橡膠圈和防脫環



圖4-7 NS型耐震接頭防脫環定心橡膠圈和防脫環接合後

4.2.2 耐震接頭(NS型)基本施工方法簡介

NS型耐震接頭與一般K型接頭在接合上最大差異在於，接合時係採用推入之施工方式，其接合時係將橡膠圈裝入承口後再把插口插入接合完成。直管於防脫環和插口突緣部之間留有伸縮空間，插口突緣部與NS耐震接頭底部亦留有一伸縮量(Y)(圖4-8)，又稱為標準接合有效長，75mm~100mm口徑之NS型直管其Y值為45mm，150mm~250mm之NS型直管其Y值為60mm，可在此範圍伸縮。

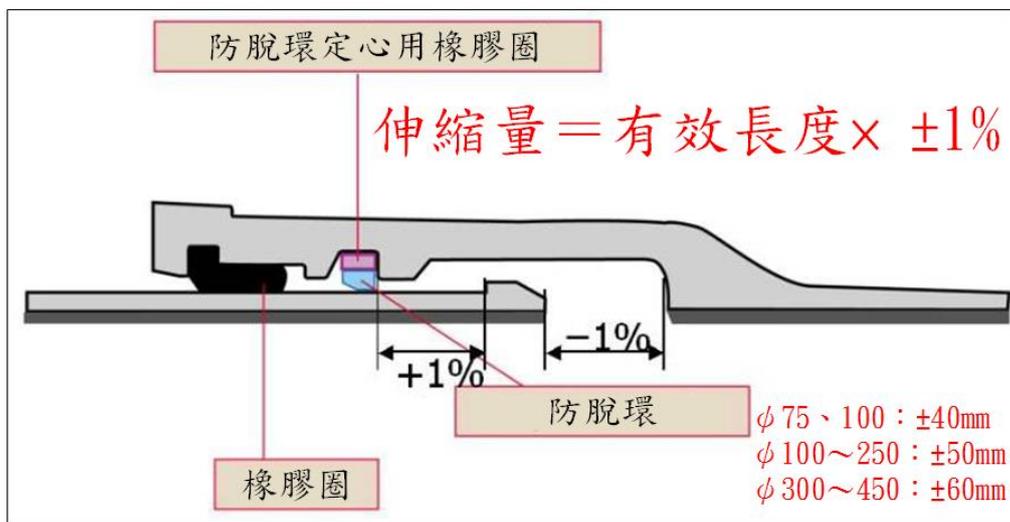


圖4-8 NS型直管耐震接頭伸縮量

1. 直管接合步驟及要領：

- (1) 配管製造商商標應位於上方，發生事故等狀況時，較易確認口徑、製造年份和管種。
- (2) 承口溝內之異物須以螺絲起子等清除，清理插口管端約30公分範圍及附著於承口內面之油污、砂、潤滑劑、稻草、其他異物等需清理乾淨，且附著於橡膠圈正面之水漬也必需擦拭乾淨。
- (3) 防脫環和定心橡膠圈於出貨時已安裝於承口所定溝內，配管搬運中可能發生防脫環與承口中心點不一致情形、致使無法接合之狀況，應如

圖4-9所示之正確例，以目視和手觸確認其狀況。

- (4) 需確認橡膠圈為NS型用，並清理橡膠圈，把高起部分朝胸前方向，如圖4-10所示形狀放入承口內面。若橡膠圈未以正常狀態裝置於所定位置，則接合時會阻擋插口進入而無法接合。裝置橡膠圈後，用塑膠槌敲打橡膠圈使其密合於承口內面，用手觸摸承口內面，確認其是否平順。

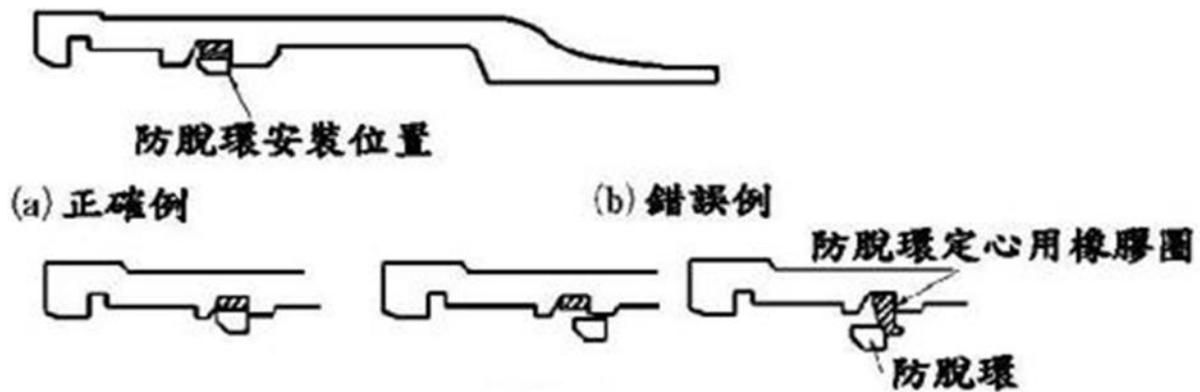


圖4-9 固定防脫環

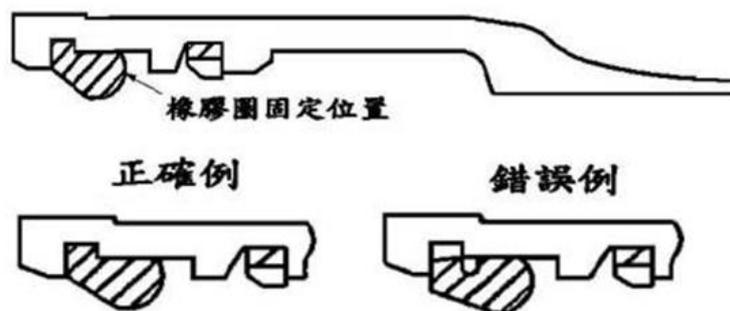


圖4-10 裝置橡膠圈

- (5) 測量承口端面至橡膠圈最頂端之尺寸(圖4-11)，並記入於檢查表中。
作為接合後確認橡膠圈位置之比較值。

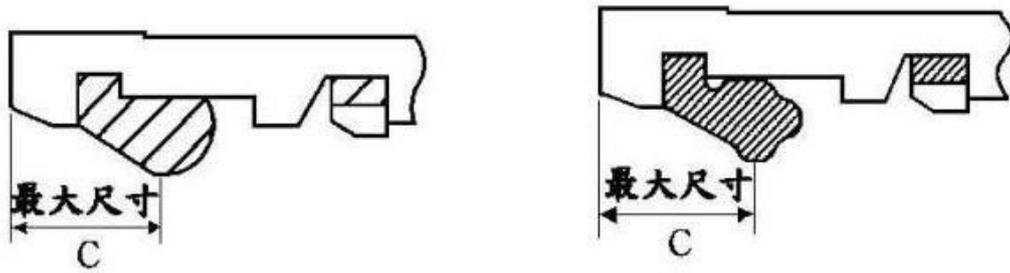


圖4-11 測量橡膠圈位置

- (6) 潤滑劑使用「延性管接頭用潤滑劑」，均勻塗抹從橡膠圈內側和插口外面之斜部到白線範圍(圖4-12)。橡膠圈未裝置前不可塗抹潤滑劑於承口內面。

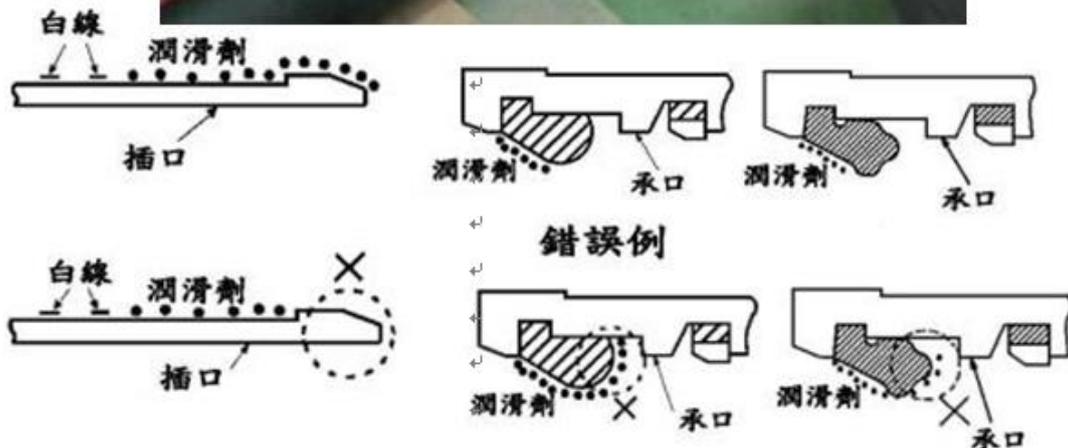


圖4-12 潤滑劑塗抹範圍

(7) 將插口放入承口，此時2只配管需呈一直線，吊起之配管處稍離地面較佳，接合器具如圖4-13所示安裝。



圖4-13 安裝接合器具

(8) 將插口徐徐插入承口內。此時，正確插入尺寸標準係將插口端面所標示2條白線之白線A與承口端對齊如圖4-14。

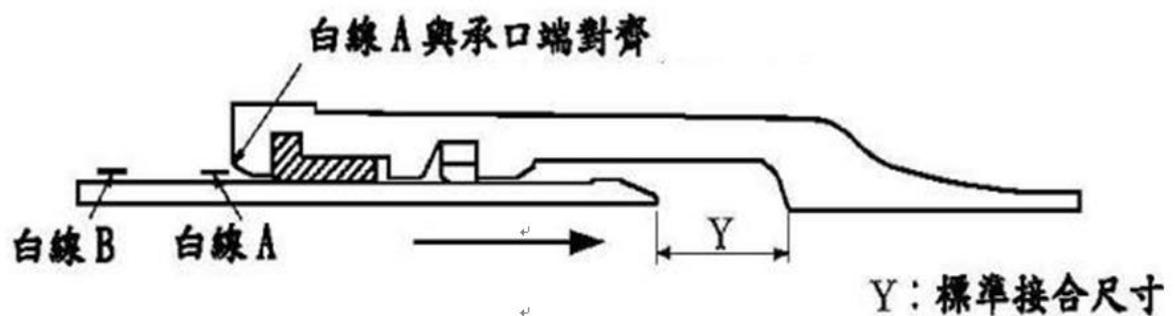


圖4-14 接合完成

(9) 如圖4-15所示，於承口和插口圓周縫隙間插入薄板量規，確認是否有超過伸入量(b)之最大尺寸(c)。若有異常數值時，測量圓周內8處所之伸入量，並記入於檢查表中。量規伸入量超出最大尺寸時，則進行拆解檢查，另再次接合時，需將橡膠圈換用新品。

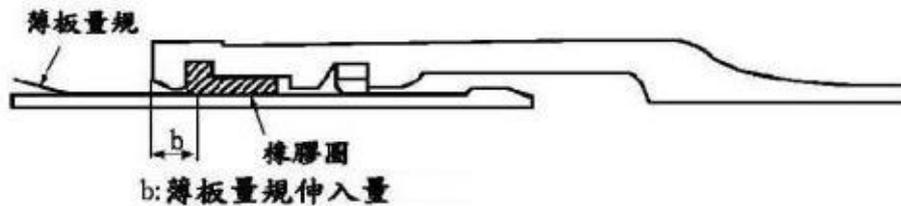


圖4-15 確認橡膠圈位置

2. 套筒接合步驟及要領：

套筒接合與直管接合最大差異在於套筒接合配件多了背托環、壓圈及螺栓如圖4-16，接合時步驟分述如下：



圖4-16 套筒接合配件

(1) 將先行管側之膠圈及背托環依續裝上，裝入套筒前先將套筒鄰續接管側之防脫環及防脫環定心用橡膠圈拆除如圖4-17。

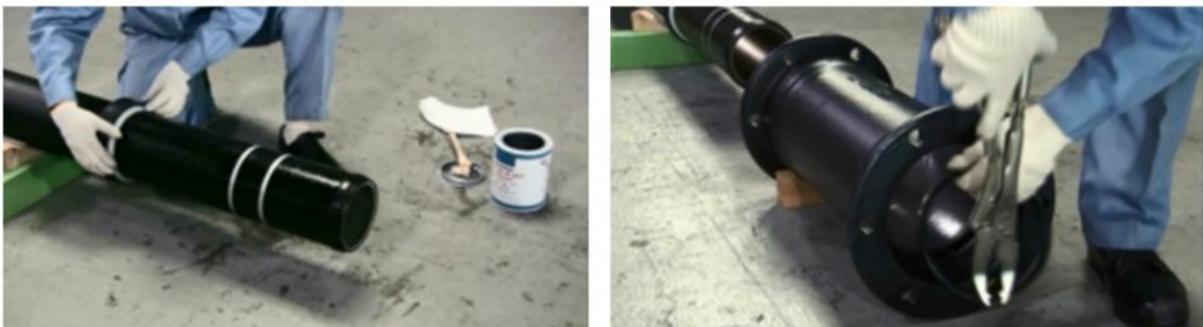


圖4-17 膠圈及背托環續裝置及防脫環及定心用橡膠圈拆除

(2) 套筒裝入先行管後將套筒向內推移直至先行管插口端露出套筒外，吊放續行管與先行成一直線，並調整位置使先行管插口端與續行管叉口端之間距依標稱管徑大維持在規定的距離(y_1) 如圖4-18。

標稱管徑	y_1	L'
75	220	80
100	220	85
150	250	100
200	250	100
250	250	100

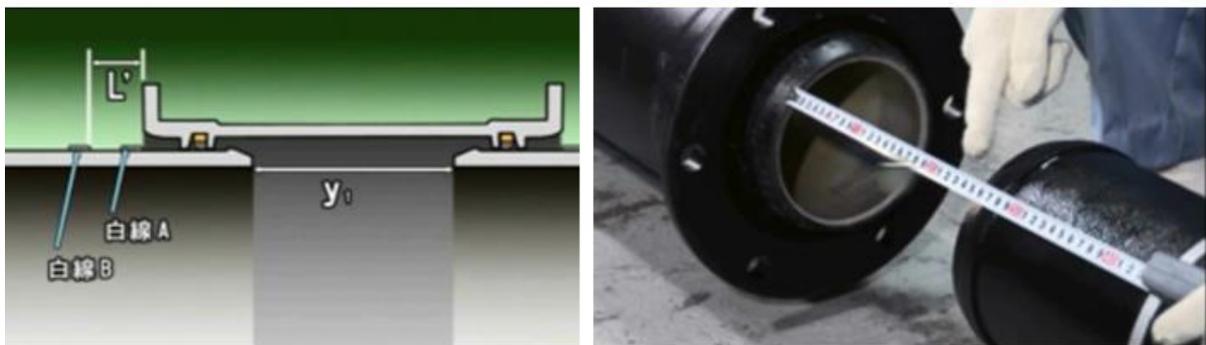


圖4-18 套筒接合插口端間距

(3) 將套筒緩緩拉出後將剛剛拆除的防脫環及防脫環定心用橡膠圈重新裝上，再將續行管側之膠圈及被托環依續裝上，續行管裝入套筒後將被托環及膠圈推入承口內。確認壓圈的方向正確後先將上半部的壓圈用螺栓鎖上承口，再將下半部的壓圈裝上並鎖上螺栓如圖4-19。



圖4-19 續接管脫環及定心用橡膠圈再度裝上

(4) 依圖所示的方式將螺栓旋緊，最後再用扭力扳手將每顆螺栓旋緊至規

定的扭力值，並將壓圈與承口的間距及膠圈裝入情形填入檢查表中如圖4-20。

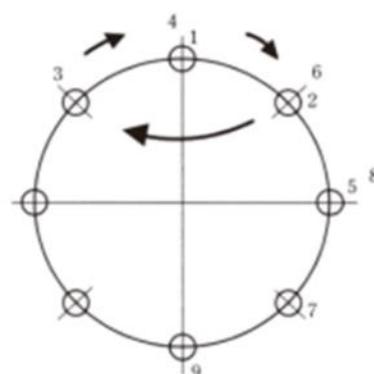


圖4-20 套筒接合螺栓旋緊順序

(5) 以上為75mm~250mm套筒接合施工方式說明，若為300mm~450mm之套筒接合，其步驟大致相同，最大的差異除了先行管插口端與續行管叉口端之間距 (y1)不同外，300mm~450mm之套筒裝入先行管前須以防脫環擴大器將防脫環撐開裝上「擋板」，擋板會將防脫環往上頂，因此插口可以很順利的通過防脫環，不須以棘輪絞鏈進行操作如圖4-21。

(6) 待先行管插口端裝入後再將擋板抽出，其後調整先行管插口端與續行管叉口端之間距，再將防脫環及防脫環定心用橡膠圈重新裝上時，同樣再以防脫環擴大器將防脫環撐開裝上擋板，待後續管插口裝入後再將擋板抽出，其餘橡膠圈、背托環、壓圈及螺栓鎖固方式，除須注意承口缺口處與背托環切斷出處必須錯開，以避免漏水外，其餘與75mm~250mm套筒相同如圖4-22。

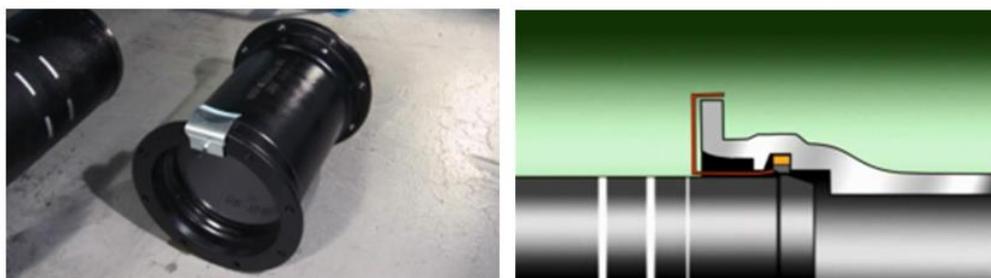


圖4-21 300mm~450mm套筒接合裝上擋板

標稱管徑	y_1	L'
300	300	150
350	300	160
400	300	160
450	300	165

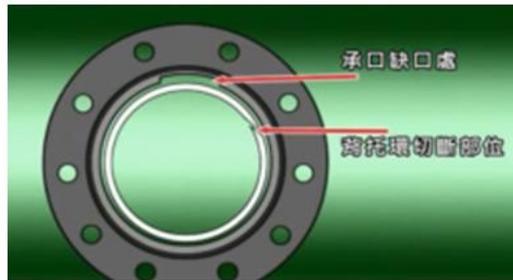


圖4-22 300mm~450mm套筒接合插口端間距

3. 切管及製作插口步驟及要領：

NS型耐震接頭切管後尚須製作插口方可進行後續裝接，且由於其工序相當繁複，因此工率甚低必須耗費相當多時間。在日本無插口突緣部之管段，多予以廢棄，此與目前北水處常用之K型接頭延性鑄鐵管在施工及材料使用上有很大的差異，以下謹就切管及插口製作分述如下：

- (1) 切管及插口製作配件大致上保護墊圈、切溝機、切管機、C型固定環、插口環、自攻螺絲、修補液及銼刀等，如圖4-23



圖4-23 切管及插口製作配件

- (2) 首先必需依所需長度進行丈量，由於切管後裝上插口環或多出10mm，因此切斷位置必須注意將所需長度扣除10mm，切溝機沿著保護墊圈切溝完成後必須以銼刀將溝槽的毛邊去除，並使用標準量規檢查溝槽深度是否符合規定，如圖4-24~4-25。



圖4-24 切溝並以銼刀去除毛邊



圖4-25 使用標準量規確認溝槽深度

- (3) 切管機沿著保護墊圈進行切管，再使用銼刀將切管時之毛邊去除，須注意由管內進行毛邊去除時須由內而外，以避免傷及管內之環氧樹脂塗裝內襯，修整後並使用量規確認端面至溝槽的距離，如圖4-26。

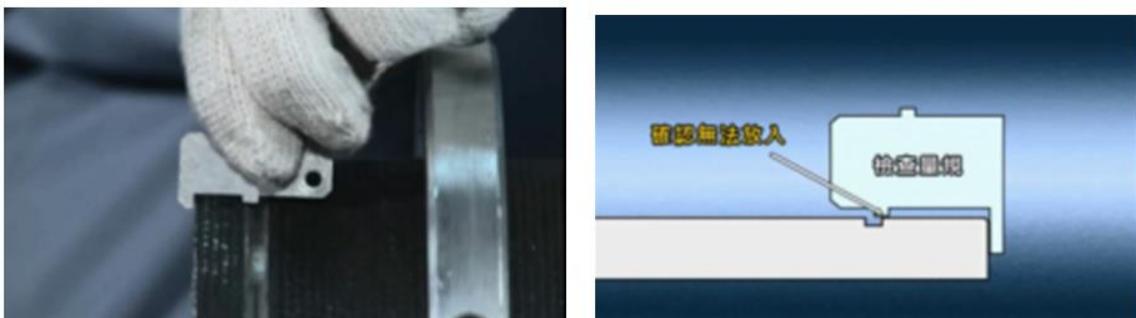


圖4-26 切管去除毛邊並確認端面至溝槽的距離

- (4) 在插口及切管後插口端開口部相對位置標示長度50mm記號，並用銼

刀作出倒角，上述加工完成後並使用鑄鐵管專用修補液進行修補，以避免傷及橡膠圈造成裝接後漏水，如圖4-27~圖4-29。



圖4-27 切管後插口端開口部標示長度50mm記號



圖4-28 在長度50mm記號範圍作出倒角



圖4-29 切管後插口端使用專用修補液進行修補

- (5) 最後裝上插口環，裝置前應先確認插口環螺栓孔是否有O型環及自攻螺絲上是否有密封橡膠，插口環裝上後自其開口對面端依續鎖上固定用C型環，並用0.5mm間隙尺確認插口環是否與插口緊密貼合，最後再用電鑽在插口環上進行鑽孔，清除鐵屑後鎖上自攻螺絲，並在插口端上標繪2條白線即完成，如圖4-30。



圖4-30 裝上插口環

4. 直管承口與管件插口接合



圖4-31 直管承口與管件插口接合所需配件

由於NS型耐震接頭設計理念主要在於當地震來臨時自來水配水管線用以抵抗地震力所產生之伸縮量主要在希望落在直管接合處，包括直管承口與插口接合處或是插口與插口利用套筒接合處，對於直管承口與管件接合處或直管插口與管件承口接合處並不允許伸縮，因此直管承口與管件接合所需配件便多了襯墊筒及襯墊筒定心用橡膠圈，如圖4-31，其接合施工要領分述如下：

- (1) 將襯墊筒及襯墊筒定心用橡膠圈裝置於直管承口內，並使用4.5mm間隙尺規量測確認無法其插入襯墊筒與承口壁之間隙，量測承口端面至

襯墊筒之距離，並於管件插口上以白漆標示，然後裝上止水橡膠圈，其餘步驟與直管與直管接合相同，為確認插入量足夠，接合完成後須確認標示於管件插口上的白線與承口端面一致，如圖4-32~4-33。



圖4-32 確認直管承口襯墊筒與承口壁之間隙

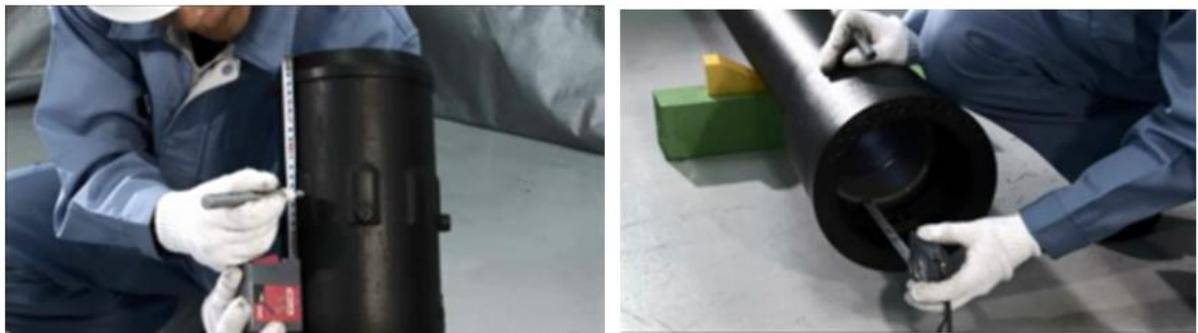


圖4-33 量測承口端面至襯墊筒之距離並於管件上標示

(2) 300mm~450mm與75mm~250mm直管承口與管件接合在配件上稍有不同，如圖4-34，此外在裝入襯墊筒及襯墊筒定心用橡膠圈前須先將防脫環取下，待襯墊筒定心用橡膠圈及襯墊筒裝入承口內部後再將防脫環重新裝上其餘接合步驟相同。

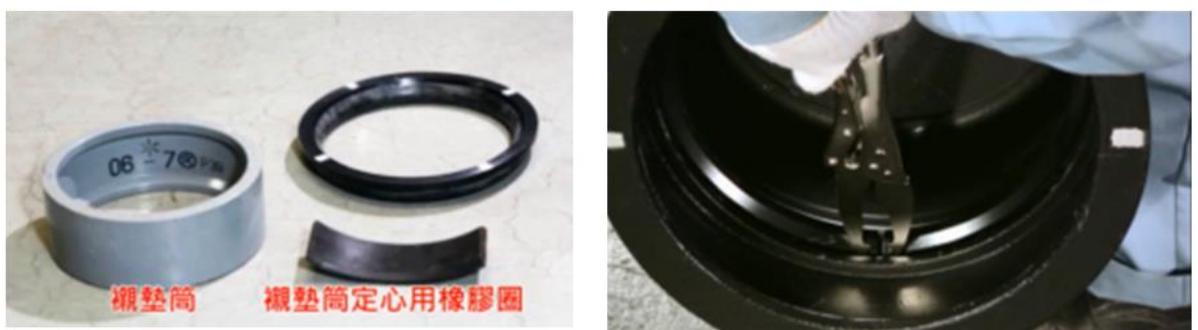


圖4-34 300mm~450mm直管承口與管件插口接合所需配件

5. 直管插口與管件承口接合

直管插口與管件承口接合及直管承口與管件插口接合最大差異在於無須使用襯墊筒，另在300mm~450mm直管插口與管件承口接合時必須使用止水橡膠圈、背托環及壓圈。其接合施工要領分述如下：

- (1) 首先務必確認管件承口深度，並在直管承口上以白漆標示，然後在承口內裝上橡膠圈，其後接合工具安裝及操作方式與直管相同，待接合完成後應確認管件承口端面與所標示之白漆應對齊一致，以確保插入深度足夠，並以尺規確認膠圈位置，如圖4-35~4-36。

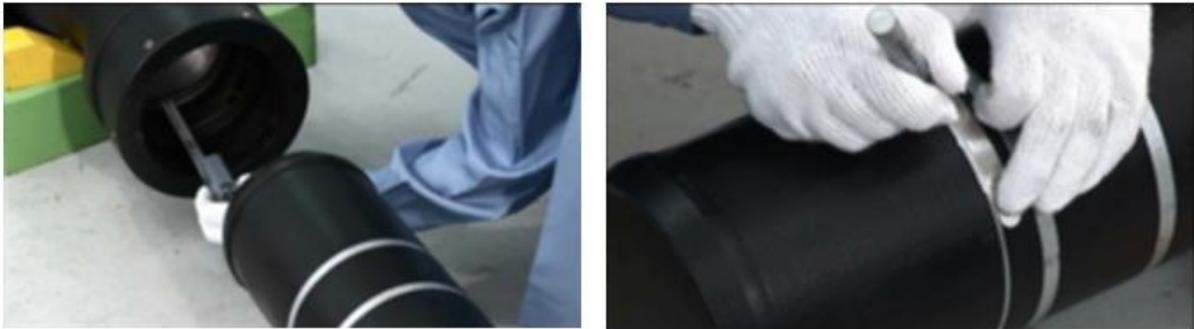


圖4-35 確認管件承口深度並在直管承口上標示



圖4-36 確認管件承口與所標示之白漆是否對齊

- (2) 最後使用六角扳手將管件承口端上的固定螺絲鎖緊以使承口內的防彎曲環緊密貼合直管插口外側。
- (3) 300mm~450mm直管插口與管件承口接合除與75mm~250mm直管插口與管件承口接合一樣須先確認管件承口深度並標示於直管插口端外，接合前在直管上必須先裝上止水橡膠圈及背托環，並以擴大器將管件

承口內的防脫環撐開裝上擋板，如圖4-37~4-39。



圖4-37 300mm~450mm直管插口與管件承口接合配件



圖4-38 確認管件承口深度並在直管承口上標示



圖4-39 安放止水橡膠圈、背托環並裝上賞擋板

- (4) 管件承口與直管插口接合完成確認管件承口端面與直管上所標示之白漆對齊一致後，再將止水橡膠圈、背托環裝入承口，並確認壓圈方向正確後以螺栓將壓圈鎖上，並以扭力扳手確認每只螺栓之扭力均達規定值，如圖4-40。



圖4-40 確認橡膠圈位置

4.2.3 試辦緣起

北水處雖於2010年即考量供水轄區位處臺北盆地及山腳斷層通過台北盆地東北方的特性，積極研擬提昇整體供水管網的耐震能力，引進鑄鐵管耐震接頭(NS型)，聘請日本專業專家於北水處職訓中心辦理為期3日針對北水處各單位基層人員的施工教育訓練，如表4-1，參訓人員便成為當時北水處推廣鑄鐵管耐震接頭(NS型)在各單位灑下的種子，中華民國自來水協會之後更在多期自來水管承裝商施工人員回訓中將此課程納入，惟後續因耐震接頭(NS型)專利問題、管材均需仰賴自日本進口價格高昂及囿於國內採購制度等因素影響，因此在當時並無法更進一步推廣應用。

表4-1 北水處2010年NS型鑄鐵管種子人員教育訓練課程表

日期/時間		A 班 (6名)	B 班 (6名)	C 班 (6名)
8/23 第一天	9:00~9:30	處長開訓致詞		
	9:30~12:00	NS型配水管講習		
	13:00~16:30	NS型配水管模擬操作		
8/24 第二天	9:00~15:00	配水管(NS型)實作講習 (配管・接合・部份拆解)	配水管(NS型)實作講習 (配管・接合・部份拆解)	給水管(波狀管)實作講習 (穿孔・配管・水壓測試・拆解)
	15:00~16:30	問題討論		
8/25 第三天	9:00~15:00	給水管(波狀管)實作講習 (穿孔・配管・水壓測試・拆解)	給水管(波狀管)實作講習 (穿孔・配管・水壓測試・拆解)	配水管(NS型)實作講習 (配管・接合・部份拆解)
	15:00~16:00	心得發表		
	16:00~16:30	結業致詞		

2016年2月6日發生了美濃大地震，由於自來水管線在此次地震中所遭受的損壞及對人民生活所造成的不便，使社會各界重新重視災害時各項維生系統的建置是否完備，並且普遍認為提昇自來水管線的耐震能力確有其必要，臺北市長柯文哲更在2016年3月22日臺北市政府第1879次市政會議討論決議事項中指出：「我們也深知臺北市如果發生7級以上地震會面臨什麼樣的問題，要達成有效防災的目標，必須有所動作，因為現在如果不做，100年後仍會面對同樣的問題」，因此北水處便在2016年9月4日至10日針對耐震接頭(NS型)的設計、施工及材料再度派遣各單位基層幹部至東京都水道局接受為期7日的實務研習(圖4-41)，以上的準備都為2017年國內首次引進NS型耐震接頭自來水管線於實際道路上進行施工奠定下良好的基礎。



圖4-41 2016年9月4日至東京都水道局實務研習

本施工案試辦成功與否取決於試辦區域的選定是否具代表性、北水處各級工程師及施工廠商施工人員對於耐震接頭(NS型)施工方法、專業知識及技能是否足夠、工程及材料招標規範內容是否完備、施工前規劃準備工作是否妥適等，以下謹就試辦過程中上述各項因素辦理情形說明如下：

4.2.4 試辦區域的選定

北水處2017年試辦延性鑄鐵管耐震接頭(NS型)施工案，係事先分析若山腳斷層發生錯動引發地震時，北水處供水轄區內發生液化的潛勢分佈，如圖4-42~4-43，並結合北水處目前已劃設完成之小區計量區後發現，北水處5個營業分處中以東區營業分處位處高液化潛勢的小區最多(133個小區)，因此方才在這些小區內再擇定初始售水率最低者為此次試辦地點。

E09010小區係位於臺北市龍江路以東、復興北路以西、民族東路以南、民生東路3段以北，初評售水率33.08%，該小區除位於高液化潛勢區外，區域周邊更緊鄰榮星花園(中山區防災公園)，區內也有五常國中、五常國小等2座學校，如圖4-44，可進一步模擬結合防災公園、維生取水站，建構震災發生時維生取水管線完整的抗震體系。

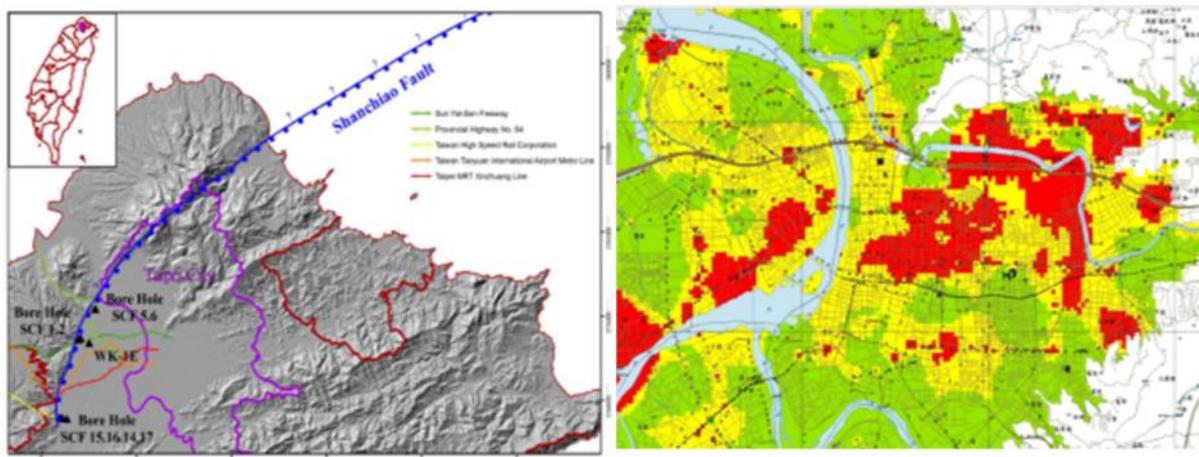


圖4-42 山腳斷層位置及發生地震時液化潛勢圖

內已可自行生產外，其餘耐震接頭(NS型)配水管材均需自日本進口，由於進口時間從下單至載運到港約需耗時3個月，並無法即時供料，且各口徑直管及管件數量受限，加以各項材料價格約為現行延性鑄鐵管(K型)的3.21~8.62倍，因此在施工前各項準備工作必須經過縝密且周詳的規劃，方可於施工中將各項得來不易的材料發揮最大效益，避免產生過多下腳料或因待料而影響試辦工程之進行。

為解決上述各項問題，實有賴於耐震接頭(NS型)資深有經驗的專家協助，進行面對面的教導及技能傳授，因此北水處便在2016年11月7日首先辦理「引進延性鑄鐵管耐震接頭(NS型)勞務案」，要求得標廠商至少必須具備耐震接頭(NS型)拆解組裝講師1人、助理講師2人及助理員2人，講師除需有日本水道協會規格(JWWA)配水管工技能講習會講師證外，相關人員並需具有日本水道協會規格(JWWA)一般及耐震接頭配水管技能登錄證及提出相當年資之相關工作經驗證明文件。

本勞務案最主要目的就在於協助北水處將原有直潭淨水場DIP管訓練場場修建成兼具耐震接頭(NS型)教育訓練功能(如圖4-45)、研訂耐震接頭(NS型)規範及規格、協助規劃設計及製作耐震接頭(NS型)施工標案發包文件、辦理北水處主辦、監造及相關人員設計及施工實務訓練與施工案得標廠商施工技能傳授與施工現場實際示範及指導工作。

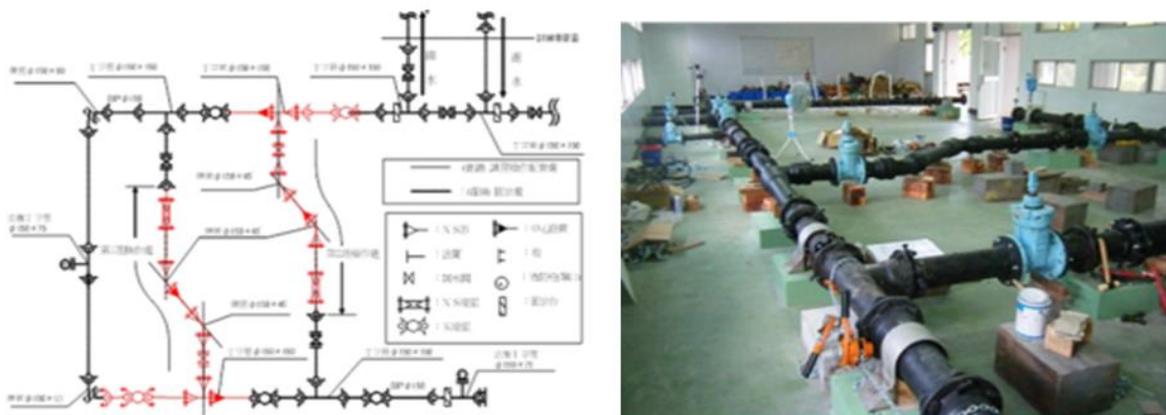


圖4-45 直潭淨水場DIP管訓練場管線平面圖

4.2.6 施工試辦標案規劃

本次施工試辦標所擇定之E09010小區，用戶數約3,321戶，總表368只，直接表343只，另由於係試辦標因此以「好施工、好教學、易觀摩」為考量，將區域內配水管口徑單一化，以200mm口徑為主，配水管預定更新長度約4,000m(200mm管線約3,200公尺、300mm管線約800公尺)，加計給水管長度約6,000公尺。

在估算本試辦工程所須包工費及材料費時，主要係依據北水處東區營業分處近幾年管網工程標案施作經驗進行分析，在廠商施工人員經過良好的NS專業訓練本工程施工標與一般K型管網單價幾乎相同，主要差別在於材料單價不同，耐震接頭(NS型)材料平均單價約為國內現行延性鑄鐵管(K型)的4.73倍。

本工程因具推廣性質，所有管材皆由日本原裝引進，故目前材料單價相對較高，盼藉由本次推動後，使國內原供應K型延性鑄鐵管等鑄造廠商，逐步引進並生產耐震型管材，帶動耐震接頭DIP材料及施工普及化。

4.2.7 施工前置準備工作

本試辦案為使國內施工人員能確實習得相關技能，除於委託技術顧問服務勞務案中要求辦理相關人員教育訓練外，並要求其所派遣之日本專家於施工標開工初期必需於現場示範施工，開工初期由日本專家及技術員於現場示範及指導廠商施工人員至少施作60公尺以上，其後並於台灣留駐至施作長度至少200公尺或25日曆天以上，以便於現場指導施工及接受相關單位的諮詢。

另外在施工案得標廠商部分，由於延性鑄鐵管耐震接頭(NS型)與延性鑄鐵管(K型)在施工方法及工率上差異甚大，因此本試辦施工案即要求施工

廠商得標後需至少派6名施工人員，接受北水處所辦理之延性鑄鐵管耐震接頭(NS型)施工實務訓練，受訓時間為2至3日，未經訓練合格者不得進入管溝進行延性鑄鐵管耐震接頭(NS型)按裝作業。另為確保施工品質，本工程每個工作面至少有3名經前項訓練合格之施工人員，廠商每日每工作面之配水管線施工長度不得大於25公尺。

此外由於臺灣道路下方地下管線眾多且複雜，施作空間有限，加以臺北市區道路挖掘時間，自2017年起受限於臺北市道路管線暨資訊中心全程攝影及逾時收工需進行通報規定而有所限縮，而NS型管件價格甚高與每支NS型直管(200mm/5公尺、300mm/6公尺)相當，為使本次引進之材料能發揮最大效益，北水處開始施作前即於施工區內10條道路的前、中、後段進行探挖(圖4-46)，並和得標廠商依探挖結果規劃NS管線配置路徑及舊管處理方式，以減少管件的使用並達成全段汰換及準時收工的目標。



圖4-46 北水處試辦工程標施工前第1階段探挖情形

最後針對舊管處理原則如下，其中若舊管上方無其他管線覆蓋之路段，且舊管筆直平行於路面無偏折，採同管溝抽換；舊管若遭其他管線覆壓或於人行道下方，舊管則予以就地廢棄，新管依探挖結果沿無其他管線之位置進行埋設；舊管上方無其他管線覆壓，但該巷弄因設有多處污水人孔，舊管已配合改遷者，為減少使用NS彎頭，如探挖結果有合適空間，則新管採另闢新管溝施作，後續再回頭拆除舊管。

以上這些施工前準備工作，在施工接近尾聲的時刻回頭檢討，發現這些都至為重要，其中除了能使得標廠商施工人員事先了解並實際操作耐震接頭(NS型)的施工方法及所需的自主檢查內容外，並且能學習日本專家在管線組配及自主檢查時一絲不苟的精神及工藝，並進而轉化為國內化的施工方法，使得後續現場實際道路挖掘施工時能很快的上手，甚而比日本專家在遭遇地面下雜亂紛陳的施工環境時能更靈活快速的予以克服；也因為有施工前的探挖工作，使得監工人員及廠商施工人員在受限的施工時間下，能很充容並且以最精簡的配管方式減少管件的使用如期的完成每天的工作。

4.2.8 耐震接頭(NS型)與K型接頭施工差異分析

本試辦工程自106年底開工，預定至108年初竣工，初期由委外技術服務日本專家親自於管溝內組配相關管件，到後來由北水處得標廠商施工人員負責施作，日本專家於管溝上監督、確認並接受咨詢，期間明顯體認到日本專家對於施工規範的堅持，而國內施工人員也展現克服困難的靈活性，當中必然因不同國籍、文化衝擊下產生火花，惟初期經過彼此相互溝通折衷最後終能達成共識，也因為有經過這段期間溝通，終讓日本專家體會到台灣現地埋設管線的高度挑戰，而施工人員也能了解日本專家的堅持，都在於確保管線埋設後的耐震能力，下面就針對本工程試辦過程中有關耐震

接頭(NS型)與K型接頭施工差異進行分析說明：

(一)耐震接頭(NS型) 接頭處需較大的施作空間

由於耐震接頭(NS型)係於接頭處安裝棘輪絞鏈並採推入方式進行接合，因此在接頭處所需的施作空間較K型接頭大，以方便施工人員於管溝內進行NS管件安裝，例如200mm口徑日本專家原要求接頭需進行長2.0公尺X寬1.4公尺範圍的擴挖，如圖4-47，惟北水處200mm口徑標準管溝寬度僅為0.6公尺，且一般並無針對接頭處進行擴挖，因此若針對接頭處進行擴挖，除容易造成塌陷外，尚需額外進行路面切割，亦需耗費相當多時間；另管溝假修復後之路面於全面銑鋪前亦不美觀，經溝通後日方同意全管溝採最小寬度0.8公尺進行挖掘，如此除可符合台灣施工人員以往施工方式亦可符合NS接頭安裝施工及自主檢查之所需。

後續進行300mm口徑NS管線埋設時，原300mm標準管溝寬度為0.7公尺，有了之前施作200mm口徑NS管線之經驗，監造單位與承商以及派駐現場之日本專家共同研商後決定300mm口徑NS管線採全段管溝採寬1.0公尺進行開挖配管。



圖4-47 施工初期接頭處擴挖完成2.0公尺 x 1.4公尺

(二)耐震接頭(NS型)施工需將管溝清出後方可配管

本工程在開始施工初期，日本專家每日施工均要求將當日預定挖掘總長度(如25公尺)之管溝空間全清出後，才依現場管障分佈情形決定配管方式，如圖4-48，因此北水處剛開始每日埋設直管長約僅15公尺~25公尺，經雙方溝通後並經北水處提出施工前試挖資料，日本專家方同意北水處採每日施工先行完成2支配管長度挖掘後即進行配管工作。



圖4-48 管溝全部清出後日本專家於管溝下規劃配管噴漆

(三)耐震接頭(NS型)管線可撓角度較小插口環處理費時

耐震接頭(NS型)遇管障或與K型管連絡時，需要較多的時間反覆測量配管規劃，安裝後並重複確認，如圖4-49~4-50，且遭遇管障處接頭安裝施工時間較長，因安裝工具使用上有空間限制，管障需清理出的空間也較大。



圖4-49 耐震接頭(NS型)遇管障需反覆測量規劃配管



圖4-50 直管切管與插口環處理較為費時

(四)耐震接頭(NS型)接頭需較繁複的接合檢核

為確保耐震接頭(NS型)接頭管線之水密及耐震性能，施工人員接頭接合檢查確認是相當重要的事，如圖4-51，而領班人員也應將接頭接合檢查結果確實記錄於接頭接合檢查表上。



圖4-51 日本專家確實完成自主檢查工作

NS型接頭檢查表因不同口徑(75~250)、(300~450)及管件型式，可分為接頭檢查表、套筒檢查表、切管檢查表4種(表4-2)，上述檢查結果均與日後管線之耐震性有很大的關連，每處接頭檢查項目均合格的情況下方能進行下一段施工。

表4-2 耐震接頭(NS型) 各項接頭檢查表1

NS型接頭檢查表(φ75~φ250)		民國 年 月 日	
工程名稱		配管工	
圖資編號 ・測點			
標稱管徑			
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p>直管承口</p> <p>管件承口</p> </div> <div style="width: 35%;"> <p>直管承口 (無視墊筒)</p> <p>直管承口 (使用視墊筒)</p> </div> </div>			
管線編號			
管線材質			
示意圖/視墊筒			
接頭編號			
清潔			—
確認防脫環、防脫環定心用橡膠圈			—
確認視墊筒位置(d部) ^{*1}			3
插口插入長度標示(白線)			5 8
承口端面~橡膠圈最頂部的最大尺寸法(c)			1 6
潤滑劑			—
確認白線標示位置 ^{*2}			5 8
間隙尺插入長度 (b) (確認橡膠圈位置)	全周檢查		
	①		
	②		
	③		
	④		
	⑤		
	⑥		
	⑦		2 7
	①		
	③		
	⑤		
	⑦		4
確認防彎曲環 ^{*3}			8
判定			—

表4-2 耐震接頭(NS型) 各項接頭檢查表2

NS型接頭檢查表(φ300~φ450)		民國 年 月 日	
工程名稱			配管工
圖資編號 ·測點			
標稱管徑			
管線編號			
管線材質			
示意圖/襯墊筒			
接頭編號			
清潔			—
確認防脫環、防脫環定心用橡膠圈			—
確認襯墊筒位置(d部) ^{※1}			3
插口插入長度標示(白線)			5 8
承口端面~橡膠圈最頂部的最大尺寸(c)			1
潤滑劑			
確認的白線標示位置 ^{※2}			5 8
間隙尺插入長度 (b) (確認橡膠圈位置)	全周檢查		
	①		
	②		
	③		
	④		
	⑤		
	⑥		
	⑦		
受口端面~白線B 間隙(a)	①		
	③		
	⑤		
	⑦		
背托環的方向 ^{※3}			6
螺栓、螺帽	數量		—
	扭力(N·m)		—
壓圈~承口端面 間隙 ^{※4}	①		
	③		
	⑤		
	⑦		
橡膠圈的狀態 ^{※5}	①		
	③		
	⑤		
	⑦		
判定			—

表4-2 耐震接頭(NS型) 各項接頭檢查表3

NS型套筒檢查表(φ75~φ450)				民國 年 月 日
工程名稱				配管工
圖資編號 · 測點				
標稱管徑				
管線編號				
管線材質				
示意圖				
接頭編號				
清潔				—
確認承口溝槽(防脫環)				—
背托環的方向 ^{*1}			①	
兩端插口的間隙(y1) ^{*2}	①			②
	③			
	⑤			
	⑦			
承口端面~白線B的間隙(L') ^{*3}	①			②
	③			
	⑤			
	⑦			
潤滑劑				—
螺栓、螺帽	數量			—
	扭力(N·m)			—
壓圈~承口端面間隙 ^{*4}	①			②
	③			
	⑤			
	⑦			
橡膠圈的狀態 ^{*5}	①			③
	③			
	⑤			
	⑦			
判定				—

備考

1. 白線標示的位置

標稱管徑	l1
75	165
100	170
150	195
200	195
250	195
300	230
350	240
400	240
450	245

2. 兩端插口的間隙(y1)

標稱管徑	y1
75、100	220
150~250	250
300~450	300

3. 插口白線B跟承口端面的間隙(L')

標稱管徑	75	100	150~250	300	350、400	450
L'	80	85	100	150	160	165

(五)耐震接頭(NS型)管線接合需使用較便利工具

本案由4.2.2節中可以發現耐震接頭(NS型)除因接合方式不同，因此在接合工具上與K型接頭有很大的不同外；另經由本次試辦發現，為縮小接頭處擴挖範圍，使整體工作更具效率，也為使得在切管及製作插口環時能更省時，因此即使相同的工具應用在耐震接頭(NS型)上，必須引進國外更便利的施工工具，甚至藉由國內承商豐富的工作經驗及智慧將國外工具進行改良，可使整個管線裝接工作更順利(圖4-52及圖4-53)。

此外由於耐震接頭(NS型)內襯為環氧樹脂粉體塗裝，因此在施作給水管裝設不鏽鋼鞍帶分水栓時，引進日本目前普遍使用的鞍帶分水栓專用電動鑽孔機，並使用角度較尖銳之鑽頭(圖4-54)。



圖4-52 耐震接頭(NS型)所使用之扭力扳手



圖4-53 國內承商自行改良前後之切管用水管架



圖4-54 耐震接頭(NS型)粉體塗裝內襯所使用之電動鑽孔機

(六)耐震接頭(NS型)套筒所使用之壓圈應使用耐震型特殊壓圈

臺灣目前NS 套筒接合時所使用之壓圈為一般壓圈，並不具耐震功能，地震發生時使用一般壓圈的套筒容易左右晃動，導致套筒內前後管的插口會相互碰撞，進而傷及防脫環造成管線脫接之情形。故於套筒接合時應使用耐震型特殊壓圈。

(七)耐震接頭(NS型)管應保持水平接合

NS 管在非水平接合時，容易出現插口無法筆直地通過插口環或橡膠圈偏位等的情形發生，應儘量避免非水平接管。

(八)耐震接頭(NS型)管應注意搬運及現場暫置

耐震接頭(NS型)管因為粉體塗裝，管材搬運時應避免拖拉或滾動管材，應使用尼龍吊帶以吊掛的方式進行搬運；現場管材暫置應使用管台或緩衝材，而非直接放置地面，以保持管體及其粉體內襯的完整性。

4.3 波狀管與障礙物施工探討

早期用戶給水外線多為塑膠管、鉛管或PB管等，然部分材料本身使用年限短，容易發生漏水，或可能有析出有害人體健康之重金屬，故北水處於1998年開始全面採用優異材質之不鏽鋼管做為用戶給水管，其使用年限可達20年以上，並可提供良好之水質給用戶，但因不鏽鋼管屬剛性材質，如地面下埋設遭遇障礙物時，需搭配S型管件或以90度彎頭與短接方式克服障礙，且為提升給水外線抗震能力，避免因為地震等外力造成損壞，施工規範要求必須設置耐震3彎頭，以構架之形式抵抗地震力，此將造成接頭處數量大增，又不鏽鋼管本身為優異之管材，而其接頭鎖接之品質良莠，往往造成施工成敗之關鍵，且地下障礙物眾多，接頭處之施工空間有限，施工人員如因趕工或困難施做而便宜行事，反而造成接頭處容易漏水，另接頭成本昂貴，在考慮施工性與經濟性上，北水處2009年起參考日本等國家，採用並推廣不鏽鋼波狀管。

近年來因氣候變遷影響，鋒面來襲經常伴隨豪大雨，需靠各項水利設施如排水側溝、雨水箱涵等以重力流之方式儘速將地表水宣洩至河川，避免積水導致人民財產受到損害，然該水利結構物所佔道路下方體積龐大，如有系統交錯時皆須管線單位自行遷移管線調整位置，施工上非常困難，另自2014年高雄氣爆發生後，各縣市政府更加重視管線橫越雨水箱涵之巡查與改善，因該段管線除影響正常排水功能外，亦有漏水、漏氣、漏電等潛在性災害發生機率，故臺北市政府工務局水利工程處即針對各類管線橫越雨水箱涵進行清查，對於橫越管線有阻礙水流之虞者，均依臺北市下水道管理自制條例：「任何設施不得穿越雨水下水道、污水下水道及其附屬設施」要求限期遷移或拆除，以水利單位某分區縱走調查資料為例，1,500處橫越案件共約4,000支管線中，自來水管線者約200餘處，改善作業對北水處是一艱鉅挑戰。

4.3.1 小型波狀管

原不鏽鋼直管埋設遭遇地下障礙物時，需以S型管件或短管搭配90度彎頭方式進行繞接施工，然每1處彎管皆有2處接合點，詳圖4-55所示，除受限施工人員施做品質優劣外，亦可能因地震力拉扯導致鬆脫漏水，而不鏽鋼波狀管可視現場施工環境予以彎折，且其無接合點，並於地震時利用其本身撓曲，達到耐震之效果；另不鏽鋼彎頭與S型管件材料價格昂貴，大量使用延遲施工進度，在考量施工便利性與經濟性下，具可撓性與少接頭之不鏽鋼波狀管應為最佳選擇。

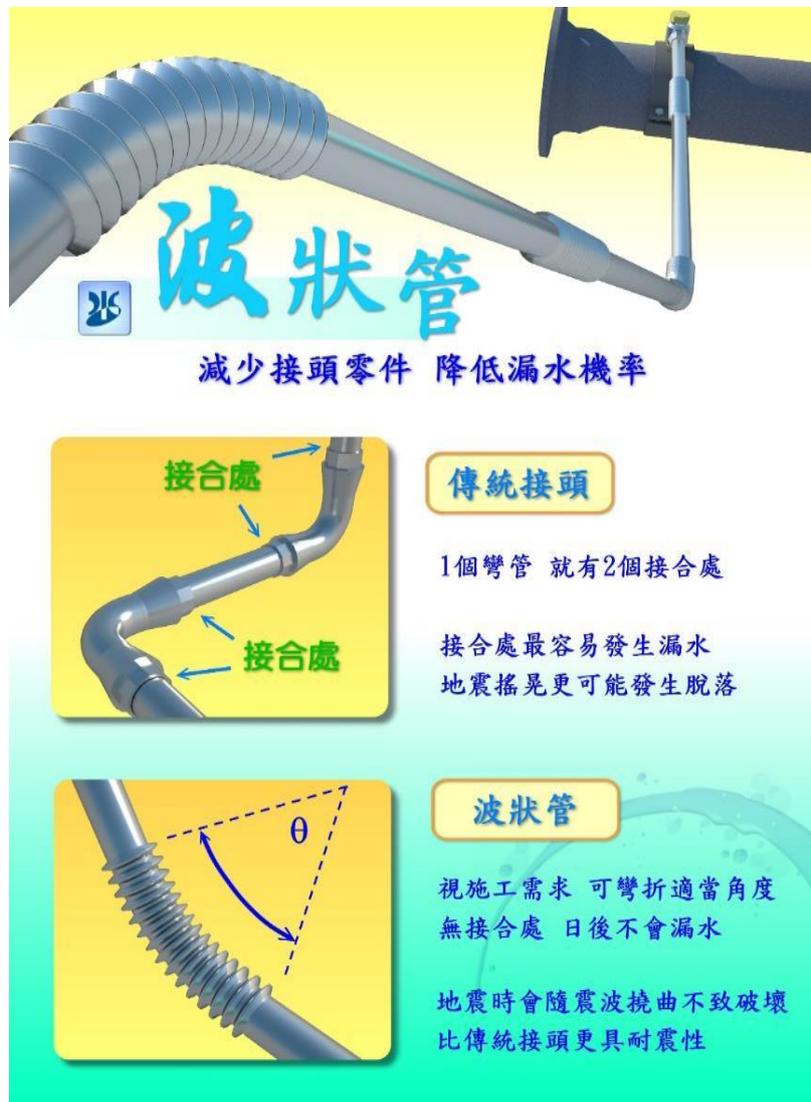


圖4-55 傳統不鏽鋼管接頭與波狀管比較

傳統不鏽鋼用戶給水管由配水管鞍帶分水栓至用戶水表，一般約需15處接合點，詳圖4-56所示，如遭遇障礙物時，其彎頭與接合點將更多，如改用不鏽鋼波狀管施工時，約僅3處接合點即可完成，詳圖4-57所示。以每接合點來看，不鏽鋼波狀管施工較傳統配管方式節省5倍以上的時間，且傳統係以3彎頭整體構架進行抗震，而不鏽鋼波狀管本身即備有耐震性，利用波狀段完全取代彎頭或S型管，並更具有調整性。

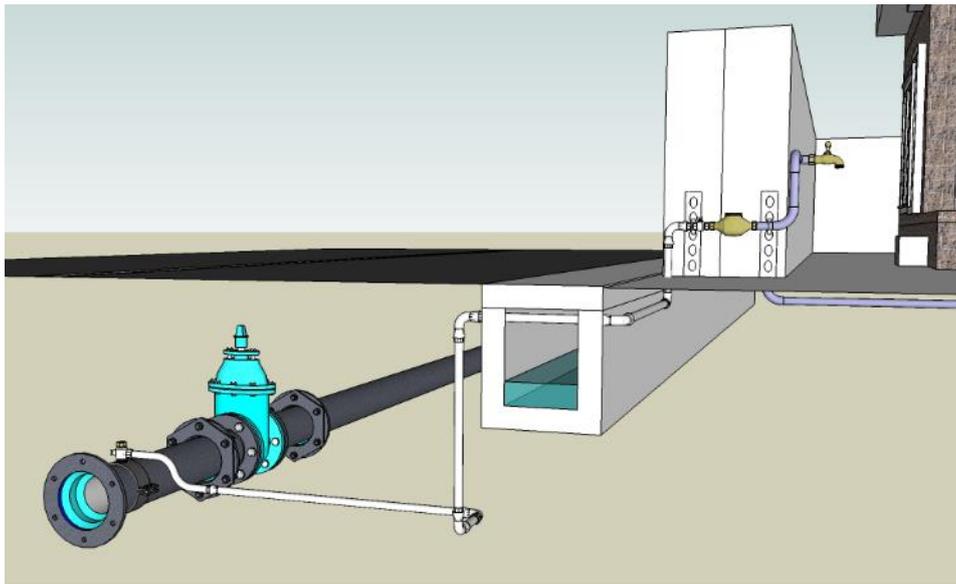


圖4-56 用戶給水管以傳統不鏽鋼管安裝

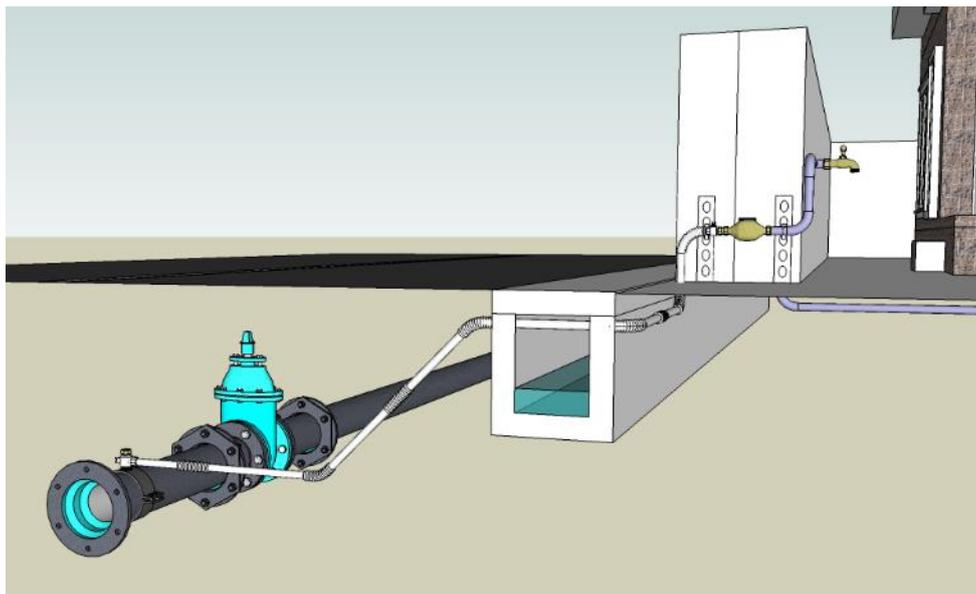


圖4-57 用戶給水管以不鏽鋼波狀管安裝

至於不鏽鋼波狀管材料價格部分，北水處於試辦初期，因國內並不普及，生產廠商較少，故每公尺價格偏高，2008年初次採購試辦時，40mm不鏽鋼波狀管每公尺2,293元、50mm不鏽鋼波狀管每公尺2,724元，經10年來北水處大量推廣採用，價格已趨於穩定，如圖4-58說明。另針對常用口徑20mm與25mm波狀管與直管歷年材料價格比較，可看出波狀管材料價格已有相當競爭力，如圖4-59說明，目前國內廠商已有昭和國際科技股份有限公司與華馬行有限公司2家廠商持續生產。若從施工成本進行比較，依北水處給水管線施工標準圖說，距離5公尺之裝接案例，傳統不鏽鋼直管所需材料有直管5公尺、S型管1只、90度彎頭3只及直接頭1只，而不鏽鋼波狀管所需材料包括波狀管5公尺與直接頭1只，波狀管施工材料成本僅約傳統直管裝接的50%(如表4-3)，究其原因為雖直管單價較波狀管為便宜，但90度彎頭價格昂貴所致，此分析僅採用耐震3彎頭進行比較，如遭遇地下管線障礙物時，為配合地形轉折，其彎頭使用數量將會更多，相對成本亦將大幅上升，由此可見以波狀管施工具有高度經濟效益，且施工時因接頭處較少，亦可加速施工效率與進度

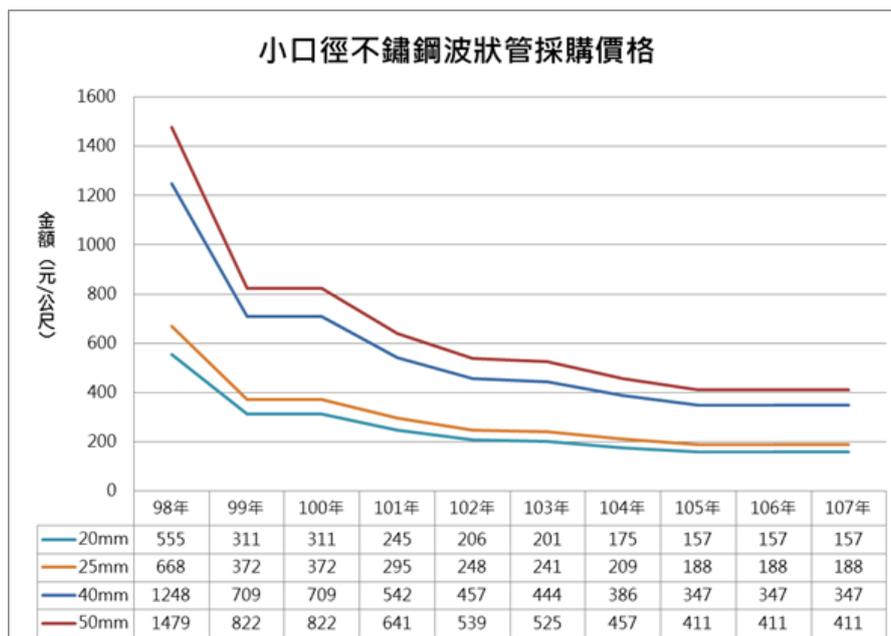


圖4-58 小口徑不鏽鋼波狀管歷年採購單價

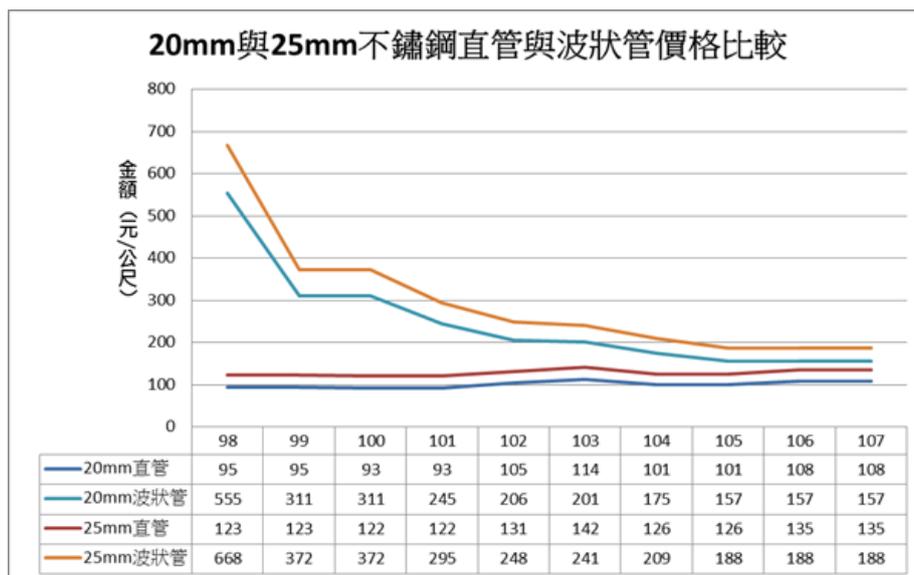


圖4-59 20mm與25mm不鏽鋼直管與波狀管歷年採購價格

表4-3 用戶給水傳統施工與波狀管施工使用材料比較

20mm傳統施工				20mm波狀管施工			
項目	數量	單價	複價	項目	數量	單價	複價
直管	5	108	540	波狀管	5	157	785
S型管件	1	331	331	直接頭	1	273	273
彎頭	3	295	885				
直接頭	1	273	273				
合計		2,029		合計		1,058	

4.3.2 大型波狀管

大口徑波狀管在日本等國家研發採用多年，其用於道路下方障礙物眾多且施工空間不足之處，除可減少彎管接頭數量，提高施工效率外，其具有伸縮可撓性，遇障礙物時可任意改變方向，並具有極佳耐震性、耐蝕性與防水性，為一優質之管材，其最高使用壓力 7.5kgf/cm^2 ，種類詳表4-4與圖4-60所示

表4-4 自來水用波狀不銹鋼管分類表

管接續型式	管口徑 mm	管長 mm
活動式法蘭型、K型承口型、K型插口型	75、100、150、200、250、300	1000、1500、2000、2500、3000、4000、5000

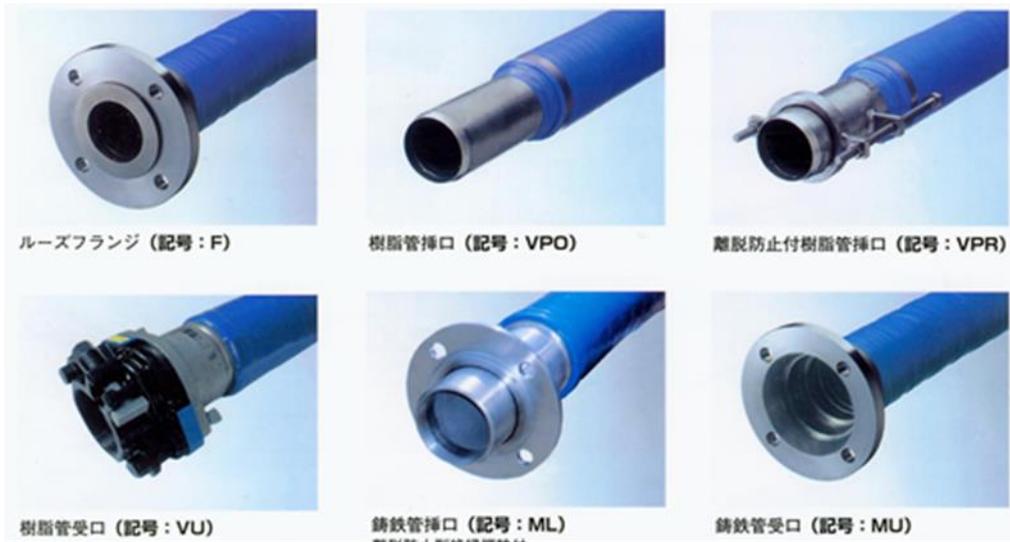


圖4-60 大型波狀管接頭種類示意

以法蘭接頭剖析其構造與尺寸基本構造詳圖4-61與表4-5所示

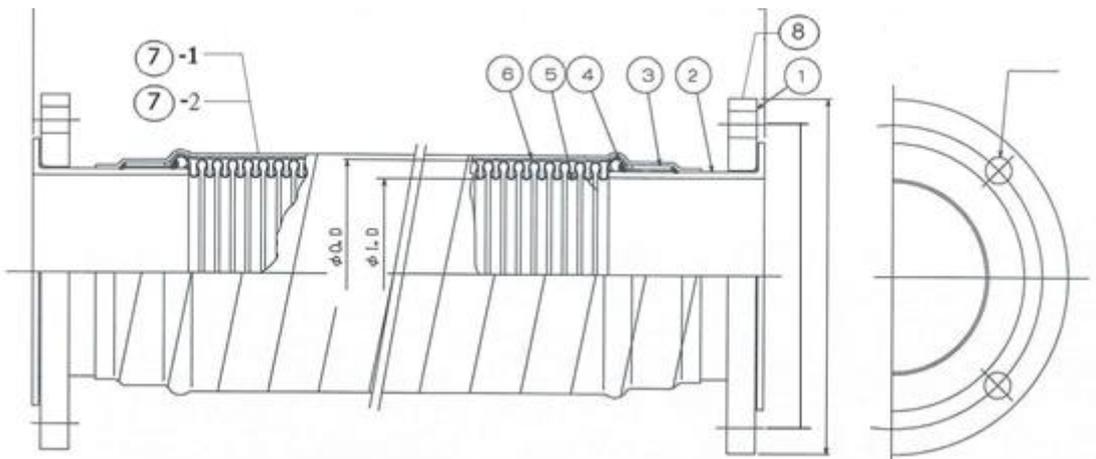


圖4-61 75mm以上自來水用波狀不銹鋼管

表4-5 75mm以上自來水用波狀不銹鋼管構造說明表

項目	說明
①	活動式法蘭(Floating Flange)
②	搭接縫(Lap Joint)
③	外環(Outer Ring)
④	頸環(Neck Ring)
⑤	波狀部(Bellows，波狀可採U型或Ω型等)
⑥	金屬編織保護層(平織帶網型 或編帶辮索網)
⑦-1	防蝕保護層
⑦-2	防水保護層
⑧	法蘭外緣
管長	由一端法蘭最外緣量至另一端法蘭最外緣
D1	法蘭外徑
D2	法蘭螺栓孔中心距
üEO.D	波狀管外部直徑
üEI.D	波狀管內部直徑
üEd×n孔	d：螺栓孔徑；n：孔數；(本項包含相對應尺寸及數量之螺栓及螺帽)

註：金屬編織保護層應為全包覆式，均勻包覆於管身，依口徑及耐壓規定，並參考圖4-62選擇適當網型編織而成。

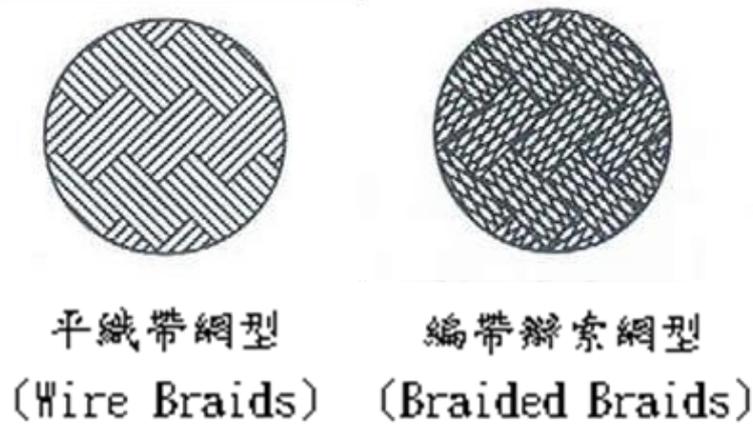


圖4-62 金屬編織保護層參考網型

另其波狀可撓部最小彎曲半徑應符合圖4-63及表4-6規定

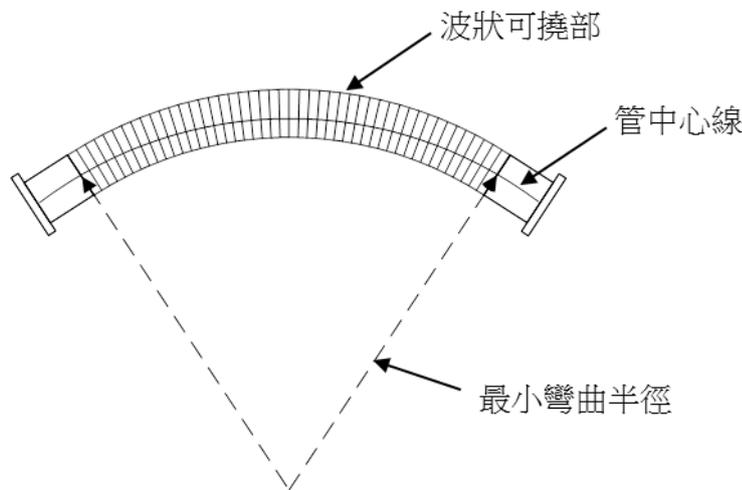


圖4-63 波狀可撓部最小彎曲半徑示意圖

表4-6 波狀可撓部最小彎曲半徑表

管口徑(mm)	75	100	150	200	250	300
最小彎曲半徑(mm)	310	400	560	750	880	1200

2009年時北水處進行150mm(長2公尺)大型波狀管試辦，先於處內進行組裝測試與觀摩，後並選定士林區兩處地點進行現場安裝，試用過程顯示大型波狀管能依現場開挖空間自由調整角度與方向，而以傳統方法施工時，需採用各種不同角度彎頭，進行搭配與計算傾斜角度，且其接頭數量較多，

整體施工效率較慢，北水處針對該次試辦成果就大型波狀管施工特性、效益與建議事項提出分析報告，並已辦理物料規範研訂；後續持續採購大口徑波狀管提供各單位採用，現提供案例說明使用過程；

1. 新北市三重區福裕街54號前

該處施工地點有排水側溝、台電管線以及中華電信管線等障礙物，施工上受限於空間障礙，以傳統DIP彎管約需10處接頭，推估穿越障礙施工時間約4.5小時，實際採用波狀管施工時，接頭僅4處，施工時間不到1小時，施工過程與管線裝接示意詳圖4-64、圖4-65。



圖4-64 三重區福裕街54號現場管障與施工現況

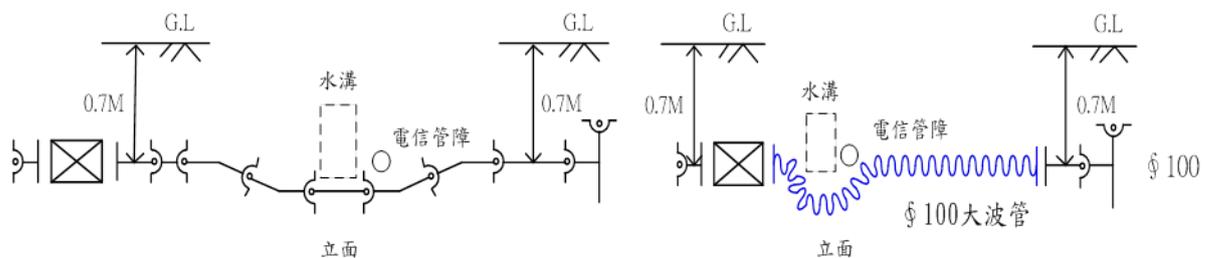


圖4-65 三重區福裕街54號管線裝接比較

2. 新北市三重區福裕街口

路口處多為各管線單位相互疊壓，自來水管因早期埋設較深，經常為外單位疊壓於上，影響管線汰換，本路口計有瓦斯管線、有線電視主傳播線路、中華電信光纖電纜、台電管線以及電信排線等，於開挖時需以人工方式小心清除，以傳統DIP彎管約需7處接頭，推估穿越障礙施工時間約4小時，實際採用波狀管施工時，接頭僅3處，施工時間不到1小時，施工過程與管線裝接示意詳圖4-66、圖4-67。



圖4-66 三重區福裕街口現場管障與施工現況

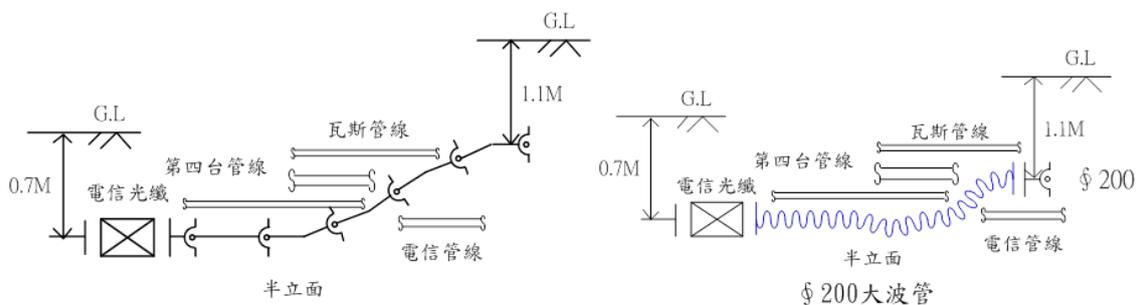


圖4-67 三重區福裕街口管線裝接比較

前述之規劃建議係為將試辦效益極大化，因傳統施工廠商對大型波狀管施工方式較為陌生，且國內材料廠商處於觀望狀態，對於投入研發量產仍有疑慮，以傳統施工方式開挖面積大、施工時間長，對用戶生活影響亦大，在民意高漲趨勢下，如何縮短工時、安全、快速完成工程，北水處積極嘗試並對於安裝過程中各項經驗與意見進行回饋分析，期能達到拋磚引玉之效；然因試辦時大型波狀管材料費用昂貴，約為傳統彎頭施工方式4倍以上，惟大型波狀管具有提升施工效率、適用各種管線障礙空間、減少接頭數降低漏水率以及提升管線耐震能力等優異性能，北水處針對其使用時機進行建議如下：

1. 配合人孔窰井施工時管線遷移，可取代4只90度彎頭方式施工。
2. 新舊管線連接如遇高低落差或水平偏移較大時。
3. 配合市政規劃將道路消防栓遷移至人行道，需由排水測溝下方穿越時。
4. 管線施工遇障礙物阻隔，作業空間受限不易施工，經現場工程司評估後同意使用。

4.3.3 障礙物施工-排水側溝

北水處辦理管網改善時，如遇地下其他單位埋設之管線時，雖施工困難，但仍可要求外單位管線相要求配合遷移調整，以完成自來水管線之更新汰換，惟遭遇雨水下水道相關設施物，因其靠重力方式進行排水，且混凝土結構體所佔體積龐大，無法要求配合施工，對於自來水管線汰換造成極大困擾。

一般而言，道路兩側皆有會排水側溝，於下雨時可使路面上之表面水迅速排除，以維持路面行車安全，而自來水之配水管線位於道路下方，而

用戶水表設置於建築線之內，需靠給水管線提供自來水，早期用戶給水管線因配合排水側溝施工，故多埋設於溝底下方，然部分路段施作側溝時，並未通知配合施工，因此亦有管線穿越側溝情事(圖4-67)；北水處進行老舊管線汰換工程時，常因側溝緊鄰建築線或人行道下方管線障礙無法向下挖掘，以致給水管無法由下方穿越(圖4-69、圖4-70)，故多半僅銜接至側溝旁，未能全面汰換，該段老舊留用之管線一再發生漏水情形，為徹底解決此一施工上之困難，避免管網改善未竟全功，北水處研議以過溝蓋版方式埋設給水管線。



圖4-68 給水管線橫越側溝

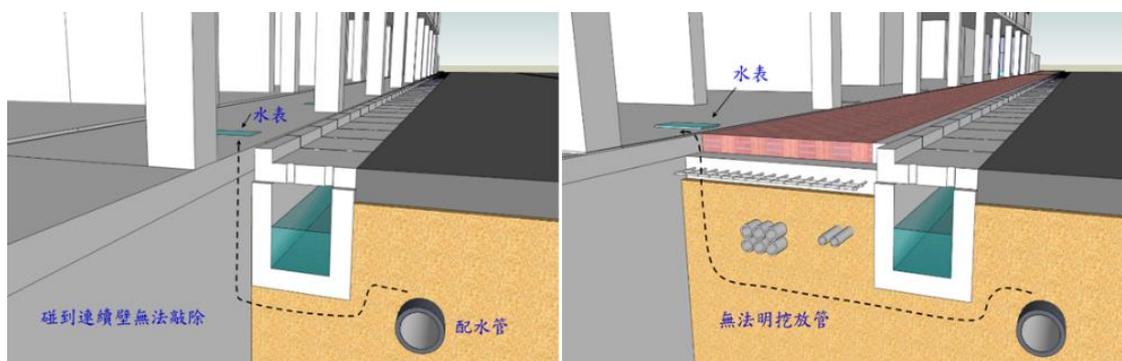


圖4-69 給水管線無法從側溝下方穿越

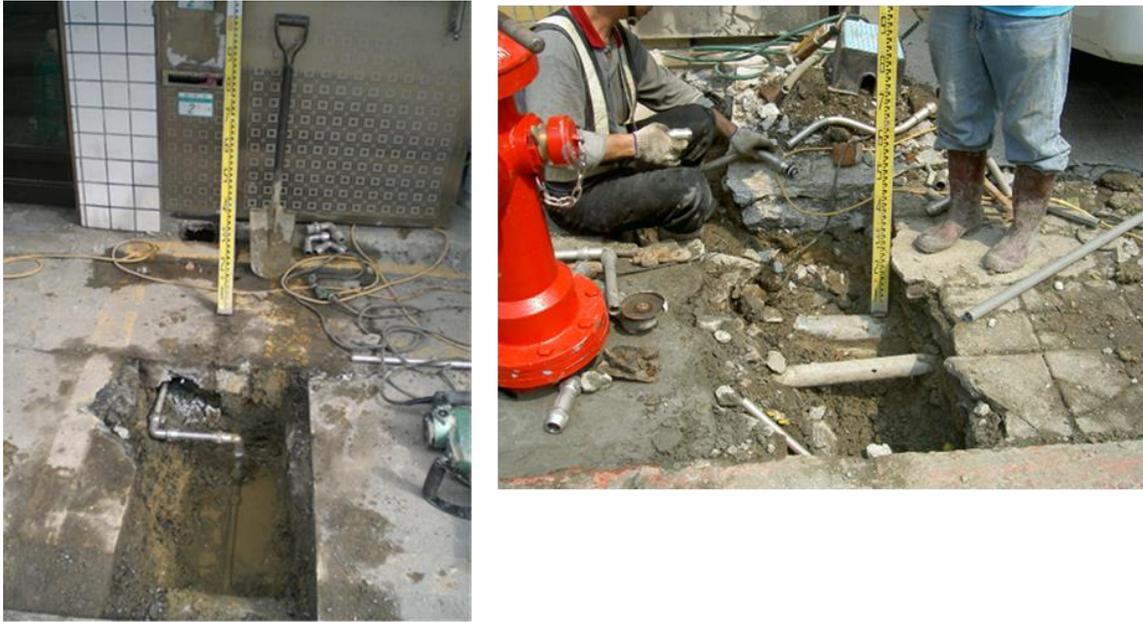


圖4-70 給水管線無法從側溝下方穿越

本案規劃以槽鋼進行組合，由3個單元共同組成(圖4-71)，50mm以下之給水管可由第1單元下方穿越(圖4-72)，可保護水管不被外力拉斷以及易於更新管線，亦不影響側溝之通水斷面，後於槽鋼護版上方直接澆置混凝土，即可成為場鑄水溝蓋版。

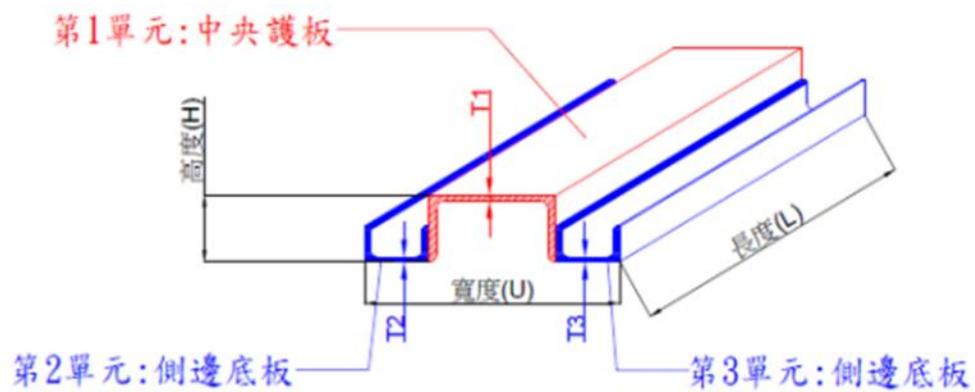


圖4-71 過溝槽鋼單元組成示意



圖4-72 50mm以下給水管線由第一單元穿越

以槽鋼護版提供管線穿越空間為北水處研發，亦為全國首創，為順利推動該項工法並獲路權單位同意，北水處先行委請專業技師進行結構計算分析，確保結構安全與可行性，並將施作完之實體進行載重試驗(圖4-73)，模擬道路上車輛直接滾壓，確保混凝土不發生龜裂與安全無虞，本案通過TAF認證報告，並獲得臺北市與新北市之路權單位同意該施工方式，讓北水處給水管線能徹底汰換；本項工法亦結合小型波狀管使用，藉由波狀處緩步彎折，於瀝青混凝土道路上至少有30公分(圖4-74)，符合路權單位最少深度之要求，兩者結合相得益彰。



圖4-73 過溝蓋版進行載重試驗

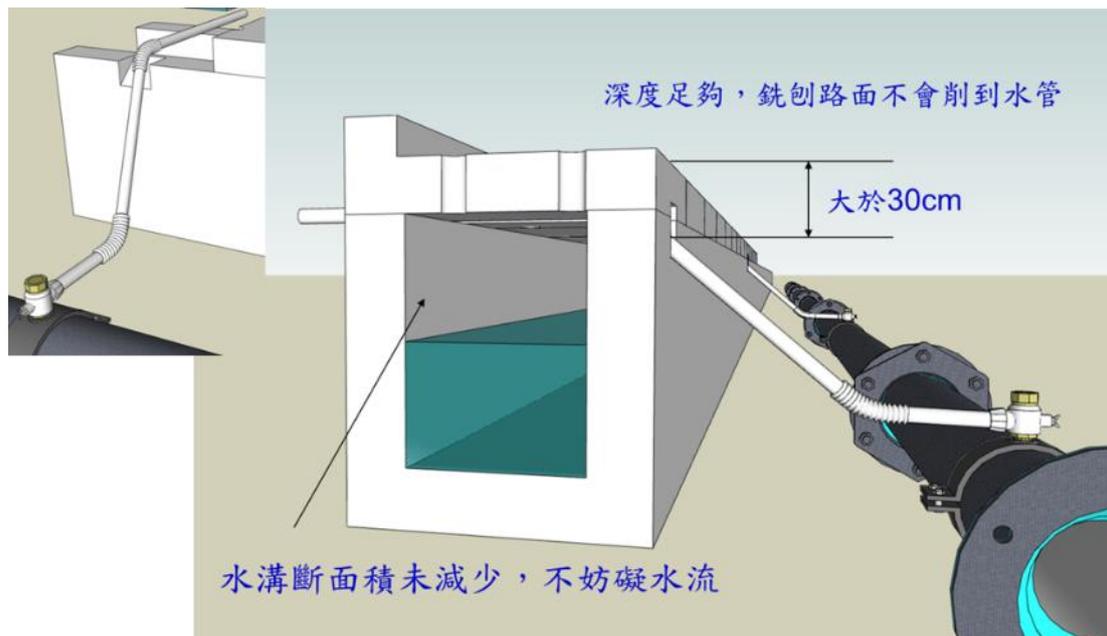


圖4-74 小型波狀管結合過溝蓋版

4.3.4 障礙物施工-雨水箱涵

自來水管線與雨水下水道皆屬民生重要管線，自來水管線係提供民生飲水所必須，並以管網方式維持穩定供水，而雨水箱涵於豪大雨期間，將都市中之地表逕流水以重力方式宣洩至河川等進行排放，避免造成淹水危害，因兩種管線系統皆須連通形成網絡，故於道路下之交錯在所難免；大部分雨水下水道箱型係以鋼筋混凝土建造，可分為單孔或併行雙孔等種類，通常通水淨斷面寬深均在1公尺以上，部分匯流集水區域，其構造規模寬度可達5公尺、深度可達3公尺以上，而下水道工程設施標準或相關道路挖掘管理條例對於雨水排水箱涵並無最小覆土深度的限制，因此早期在空間限制下，許多地下管線被迫採取破壞箱涵結構穿越方式，而自來水管線因埋設時間較早，新建箱涵施工時未通知北水處配合遷移，導致管線被其包覆於內，故現今雨水箱涵內多有管線橫越。

依水利單位將管線橫越雨水箱涵投影面積佔通水斷面之比例分為3級，第1級為所佔比例小於29%、第2級為所佔比例30%至59%、第3級為所佔比

例60%以上(圖4-75)，對於橫越管線有阻礙水流之虞者，均依臺北市下水道管理自制條例：「任何設施不得穿越雨水下水道、污水下水道及其附屬設施」要求限期遷移或拆除。



圖4-75 管線橫越雨水箱涵影響程度分級

北水處為改善管線橫越雨水箱涵情形，成立專案小組，除制訂「臺北自來水事業處管線橫越雨水下水道改善計畫」規劃改善期程外，並依管線口徑擬訂改善策略與建立準則，另依箱涵頂版上之覆土深度，進一步區分為3種改善方法：(1)原口徑改管。(2)縮小口徑改管，並依與雨水箱涵寬度，以水理分析擇定可供縮管口徑之下限。(3)若覆土深度嚴重不足，無法採前二方案改管時，則先以關閉制水閥方式模擬斷管，評估對供水管網之衝擊，在不影響用戶用水情形下，則先予斷管，並錄案研擬長期改善對策。

對於500mm以上口徑自來水管線，因口徑較大，多數均無法直接以明挖方式進行管線遷移，故以短管推進方式予以改善，本項工法最初由日本針對污水下水道工程研發成功，臺北市政府工務局衛生下水道工程處之廠商引進短管推進相關機具設備，應用於臺北市等都會地區進行分管網工程，由於其推進井與到達井所需空間斷面小，開挖容易且工作井完成後可暫時封閉，推進機具亦可配合移動，大幅降低交通衝擊，減少住戶與用路人抗議機率(圖4-76)。

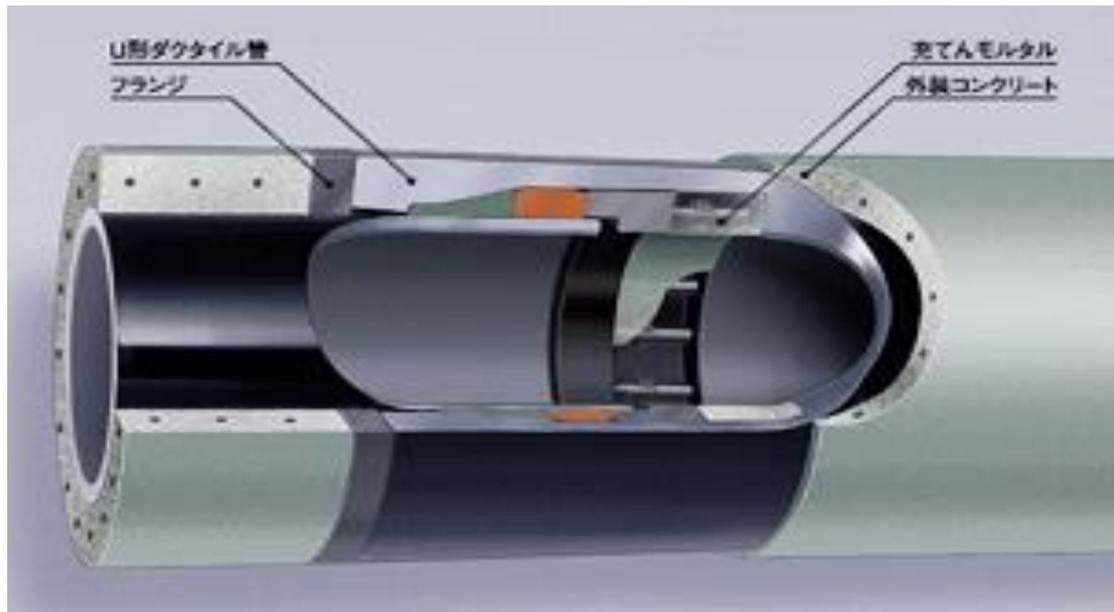


圖4-77 U型延性石墨鑄鐵管接頭

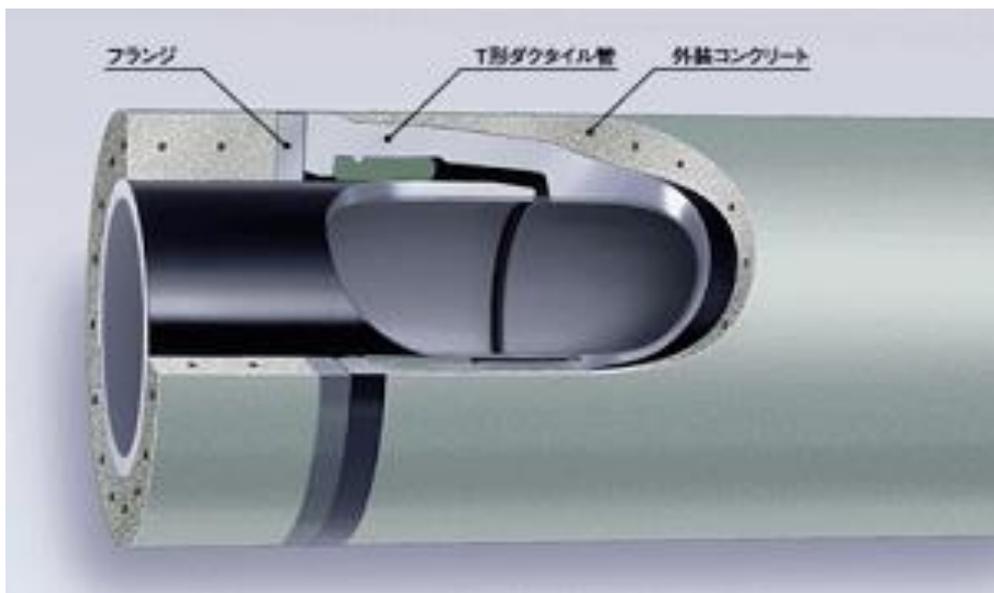


圖4-78 T型延性石墨鑄鐵管接頭

為推動T型短管推進所需使用之材料生產與施工，北水處召開「推動使用T型延性鑄鐵管」研討會議，會議中邀集國內多家各鑄鐵管製造公司均表示T型延性鑄鐵管5公尺直管可以離心方式大量生產，但1公尺長度短管則需以管件方式鑄造，其造價約與 K型延性鑄鐵管件費用相當，兩種管材差別僅僅接頭接合型式不同，K型採機械接頭，而T型採承插式以橡膠圈止水，

兩者材質均為延性鑄鐵且管件內、外各部尺寸相同，如遇漏水搶修時可相互接續使用，故制訂「自來水管線短管推進施工規範」、「T型延性石墨鑄鐵管規範」等，以克服都會地區自來水管線穿越雨水箱涵遷移不容易，或是跨越重要路口明挖埋管遭其他管線覆蓋無法抽換更新困難等問題之突破。

北水處配合臺北市政府捷運工程局辦理內湖路1段港墘路南側箱涵改善工程時，原已埋設500mm自來水管線位置較改善後之箱涵底部完成面高出12公分，將直接影響通水斷面，故決定將原有500mmMJP管敲除廢棄，改以700mm之T型短管推進(圖4-79)。



圖4-79 配合雨水箱涵進行短管推進範圍示意

其工程施工順序為：

1. 確認路面2處工作井(推進井與到達井)位置後，以搖管施工機械將圓形鋼管擋土壓入土壤，掘削鋼管內土壤並運棄(如圖4-80)。
2. 將2根圓形鋼管焊接後重覆前述動作，持續掘削至預定位置。

- 3.澆置混凝土底板，作為施工作業場所。
- 4.吊放安裝推進機頭向前推進至預定方向，推進管則放置於機頭後方，推進過程中利用抽泥機將機頭攪拌之泥水抽至推進坑外(如圖4-81)。
- 5.利用機頭之測量儀器修正方向及高程。
- 6.推管完成後進行試水，確保T型接頭之水密性及施工品質。
- 7.路面復原。



圖4-80 圓形鋼管壓入土壤並掘削運棄土壤



圖4-81 安裝機頭並推進T型短管

大口徑自來水管線穿越排水箱涵內部之線遷移作業工程存在相當難度，在都市防洪考量以及主管機關限期改善遷移條件下，以T型短管推進工法為上選之策，後續並可作為因應遭其他管線覆蓋管汰困難或穿越道路幹道之選擇工法。

另針對口徑400mm以下自來水管線以明挖方式遷移改善部分，依臺北市路權單位規定原則，管線之埋設深度於8公尺以下巷道為70公分，超過8公尺以上埋深為120公分，北水處經請結構技師計算並報路權單位核准經補強後之自來水管線最小埋深為30公分，故經開挖後如雨水箱涵頂版覆土深度足夠時，可以原口徑進行管線遷移(圖4-82)；如覆土不足，則優先考量縮小口徑以符合路權單位埋管深度規定之方式為之，對於此類案件，北水處曾經以EPANET水理分析軟體進行分析，以轄區內某一中區最大時流量(圖4-83)與集中流量之最不利因素同時發生，模擬採用多支50mm不銹鋼管或縮

小口徑時，其所造成之水壓損失均小於 $0.1\text{kg}/\text{cm}^2$ (圖4-84)，經評估因目前北水處既設管線普遍存入口徑偏大、流速偏低，亦即有過度設計(overdesign)之情形，因此，經分析局部使用較小口徑之大波管或多支口徑50mmSSP並不致影響水量輸送，壓力損失也不高，故針對此類覆土深度較為不足之處，可以採縮管方式進行改善(圖4-85)。



圖4-82 自來水管線以原口徑進行管線遷移改善

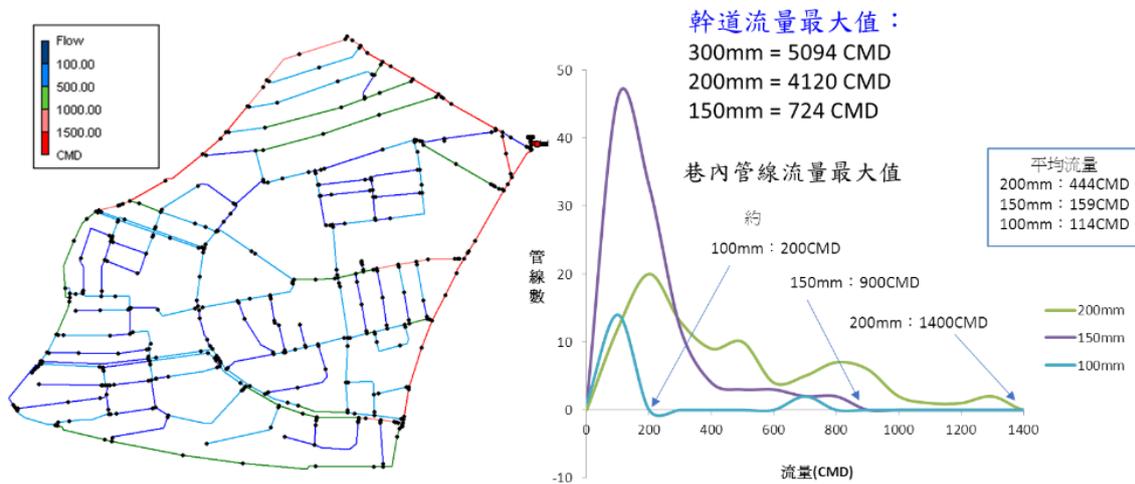


圖4-83 某中區以EPANET進行最大流量分析

多支SSP：

(前端壓力：1kg/cm²)

巷內配水管口徑	SSP支數(50mm)	最大時流量(CMD)	壓力損失(kg/cm ²)
200mm	3支	1400	0.087
150mm	2支	900	0.089
100mm	1支	200	0.018

縮小管徑(大波管)：

(前端壓力：2kg/cm²)

幹道配水管口徑	縮小管線口徑	最大時流量(CMD)	壓力損失(kg/cm ²)
300mm	200mm	5094	0.016
200mm	150mm	4120	0.029
100mm	75mm	724	0.027

圖4-84 壓力損失不影響供水



圖4-85 縮小管線口徑或以多支50mmSSP進行連接

但當雨水箱涵頂版覆土深度嚴重不足時(頂版距路面少於35公分)，其上方已完全無空間可供管線橫越，北水處為加速改善管線橫越雨水箱涵情事，避免豪大雨來襲發生淹水情事，故目前係採先以關閉制水閥方式模擬斷管，

以評估對供水管網之衝擊，評估結果在不影響用戶用水情形下，則先予斷管，以避免影響雨水箱涵水流(圖4-86)。

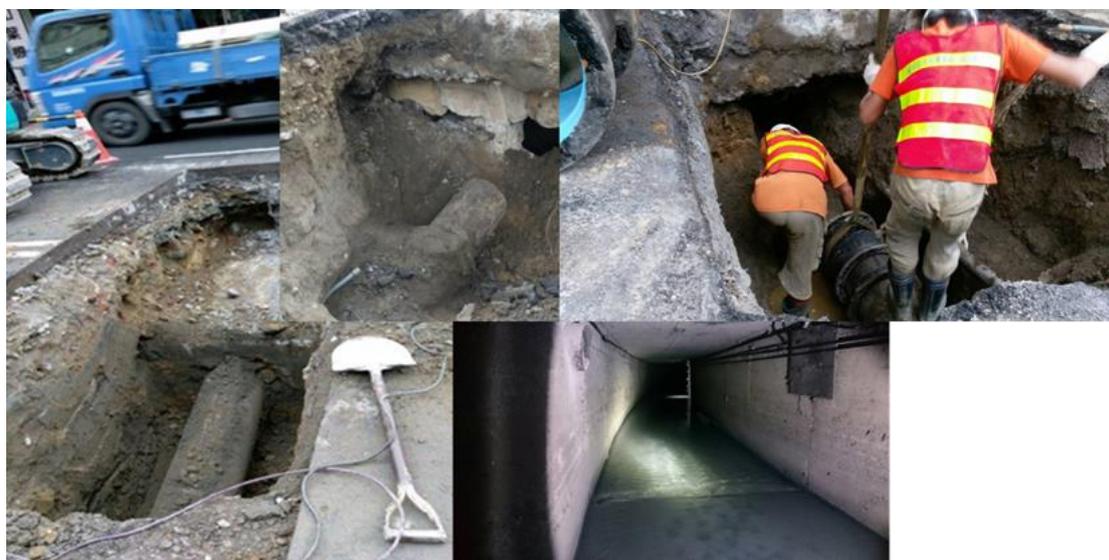


圖4-86 兩端封管並斷除雨水箱涵內部管線

惟此類先行斷管之改善方式，確存有影響北水處自來水管網正常供水之虞，故採此一方式實屬短期因應之策，以北水處於重慶北路以東、承德路以西、錦西街以南與民生西路以北之小區範圍為例，該區計有12處自來水管線與雨水箱涵互相穿越之情事，並經探挖，箱涵頂部之覆土深度均嚴重不足，依現況僅能以先行斷管方式為之，惟由示意圖中可見，若將前述穿越處盡皆斷除，則此一區域將與臨接管網隔離，變成單向供水之型態，除嚴重影響區內水壓，製造管末端影響水質外，當進水端管線發生異常狀況無法正常供水時，將導致全區無水之嚴重情形，實不利於供水穩定之確保(圖4-87)。

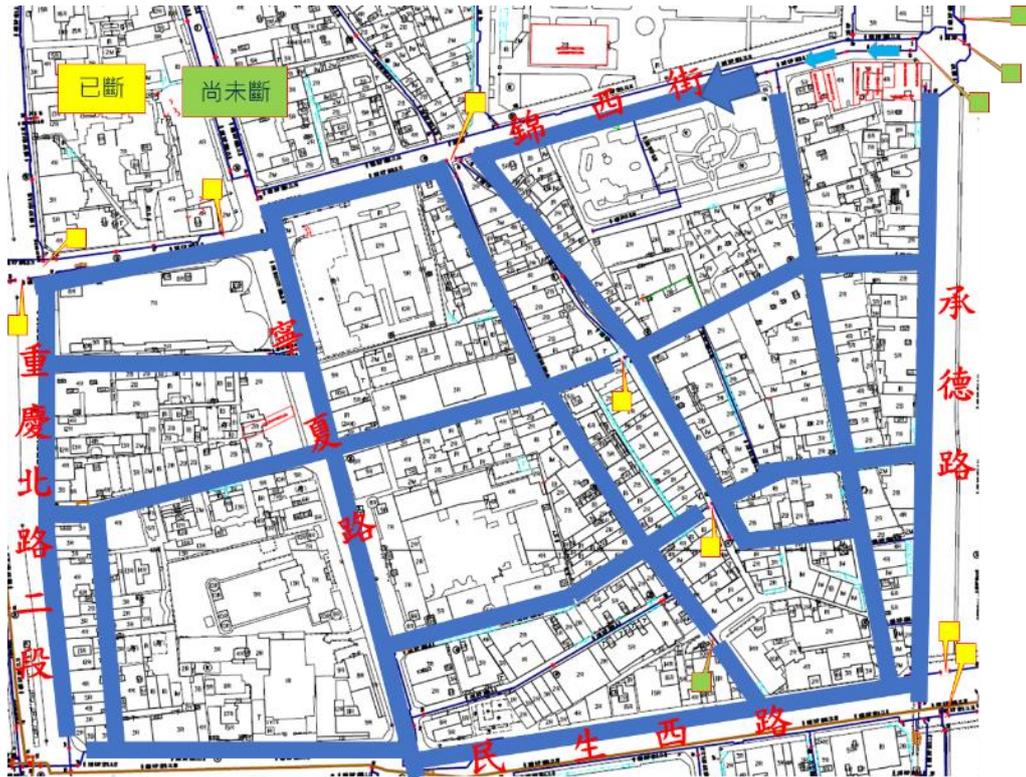


圖4-87 小區內多處斷管造成供水穩定高風險

由前述案例可見，針對覆土嚴重不足之案件，尋求徹底解決之方法確有急需，且後續尚有為數眾多之案件無法以先行斷管之方式改善，以上均造成推動管線橫越雨水箱涵改善進度遭遇嚴重瓶頸，且提供大臺北地區用戶值優量足且保障用水安全亦為北水處首要責任，經研議後構思出「管線與箱涵頂版共構」之創新方案。

考量臺北市雨水箱涵尺寸與頂版厚度(圖4-88)，其頂版 h 由33公分至69公分皆有，如將箱涵頂版敲除，安裝1-2支口徑100mm或150mm自來水管線後，再以補強方式將箱涵頂版復舊與路面復原，後續再將兩側之斷管予以聯絡，如此，除讓雨水箱涵保持原有結構強度外，亦可確保自來水管網接續連通，此一針對箱涵頂部覆土深度嚴重不足之改善方式，兼顧自來水管網連通，以及雨水箱涵結構與排水功能，值得嘗試推行。

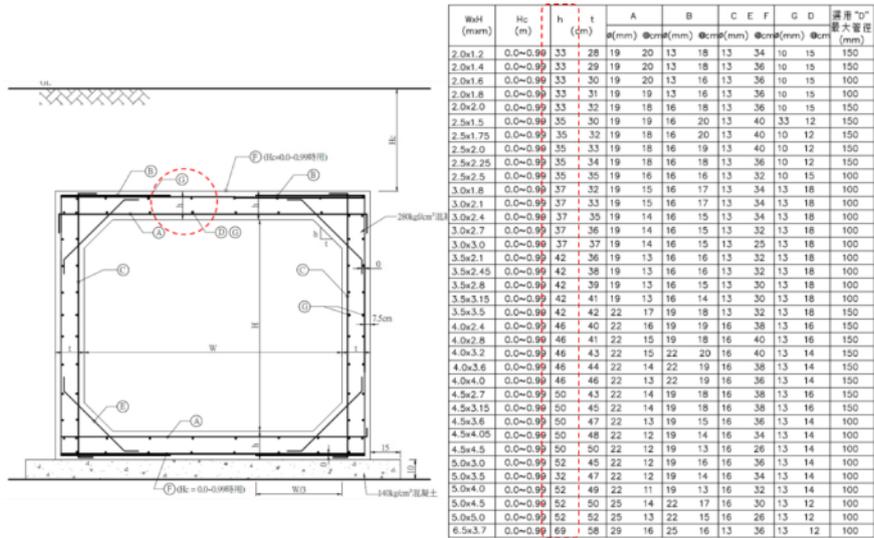


圖4-88 臺北市雨水箱涵標準尺寸與斷面圖

經北水處與水利處進行數次溝通，水利處表示有關管線單位提及橫越管線與箱涵頂版共構部分，若經評估確無其他可行之改善方式，必須與排水系統箱涵共構者，務必於事前提出經技師簽證之詳細設計圖說及結構計算書予該處審查，北水處遂委託專業工程顧問公司研討各種模擬狀況與施工方式，經考量雨水箱涵頂版橫斷面鋼筋為主筋傳遞力量，如將自來水管線埋設於內應屬可行(圖4-89)，後北水處與顧問公司將相關送設計圖說與結構計算書提送審查。

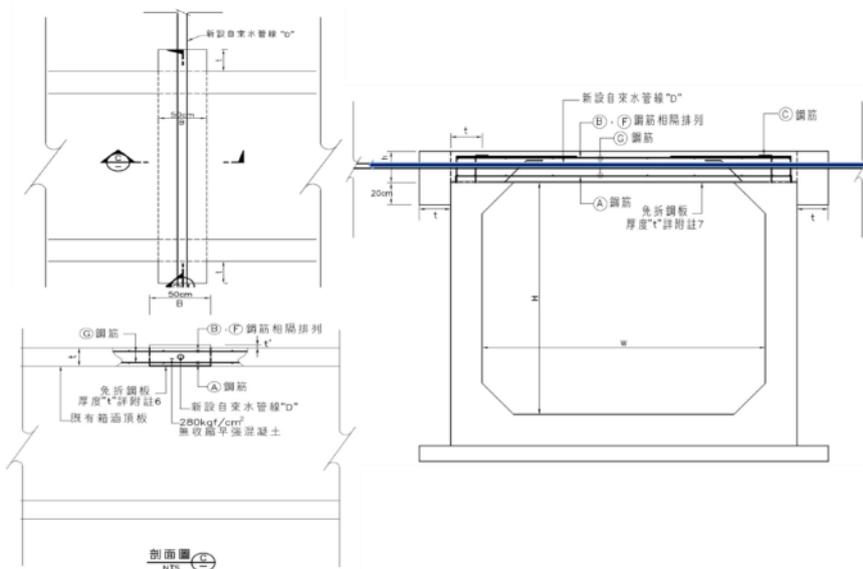


圖4-89 自來水管線與雨水箱涵頂版共構設計圖

2018年2月2日水利處邀集各相關設計與施工單位進行審查作業，並經2次修正後，自來水管線與雨水箱涵頂版共構之補強設計圖說於4月20日獲水利處同意；惟本項工法係屬首次辦理，實務上並無前例可供參考，經北水處洽詢相關廠商表示，因管線橫越位置多於巷道交口，且每日施工時間受限，在盡量減少用路人交通衝擊外，亦需考量雨水箱涵結構安全，現場施工步驟、工期與可能遭遇困難等，均尚無法於現階段即明確得知，為充分瞭解頂版共構之現場施工可行性，北水處預計於2018年度先行擇定數處進行現場實際施工試辦，以作為後續編列標案推廣之依據，另亦將搭配大型波狀管進行兩端連接，利用大型波狀管材料之可撓性，避免地震時箱涵結構體與土壤間不同震幅，導致水管遭致扯斷(圖4-90)。

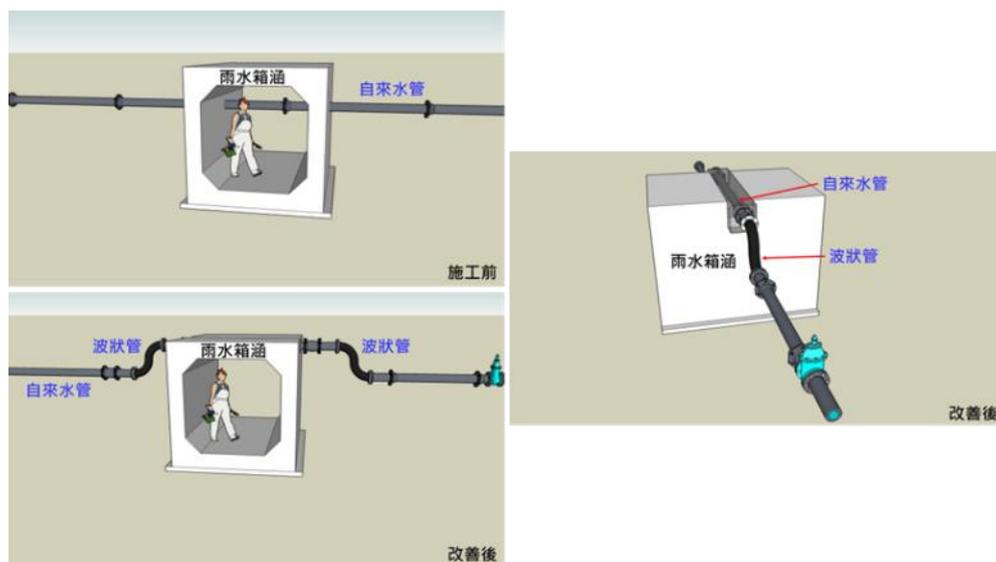


圖4-90 自來水管線與雨水箱涵頂版共構施工示意圖

前述管線與頂版共構工法經結構分析與計算已獲得水利處同意，但實務上施工所需時間與可能遭遇困難，亦需進行實地驗證，作為臺北市首次辦理管線與頂版共構之單位，北水處已先將橫越地點周邊進行探挖確認，待發包決標後即可進場施做，本案如經確認施工可行性與實用性後，其餘多處自來水管線亦可先行埋設空管後，兩端再予以聯絡改接，確保供水管網穩定，以徹底解決管線橫越雨水箱涵情事。

4.4 高密度聚乙烯(HDPE)管探討

北水處管網改善工程使用之自來水管材，在配水管部分主要管材為延性鑄鐵管(DIP)以及刻正試辦之耐震NS管，給水管部分則採用不鏽鋼管(SSP)，此類金屬管材在一般情況下為極佳之自來水管材，也為目前世界各國廣泛採用。惟由大臺北地區北投、陽明山等磺區修漏及汰換管線之經驗，金屬管材於易受硫磺氣腐蝕(圖4-91)，耐用性不佳，許多管線未達使用年限即已不堪使用，除造成漏水外，亦增加水質污染之機率；目前北水處已陸續採用高密度聚乙烯管(以下簡稱HDPE管)代替DIP管，作為磺區之輸配水管線，因HDPE管具有許多優異特性，諸如：抗腐蝕性、耐衝擊性、耐候性、施工方法單純及工程費低等優點，已為歐美先進國家廣泛採用作為輸送自來水及瓦斯。除磺區外，因HDPE管搬運輕便，亦適用於地勢陡峭、道路狹小之高地區，故於陽明山高地區已有多處裝設HDPE管。



圖4-91 陽明山磺區DIP管腐蝕嚴重

4.4.1 高密度聚乙烯(HDPE)管材簡介

塑膠類管材因為重量輕、耐腐蝕、水流阻力小、安裝簡便迅速，且造價較低等優勢，而HDPE管是繼PVC管之後，世界上消費量第二大的塑膠管

管種，HDPE管主要由高密度之聚乙烯(Polyethylene, PE)所製造出來，在塑膠材料中被歸類為烯烴族，HDPE管不會溶出任何有毒物質，即使焚化亦不產生毒素，為世界公認之環保塑膠材料。HDPE管具有優良抗腐蝕性及耐酸鹼性，PE材質可抵抗強烈地震產生之剪力及施工時挖土機等機械之碰觸，此外因重量輕、搬運方便、具可撓性等特質，亦提高於各種地形之適用性。管材接合一般採用熱熔對接法或電焊套續接，接頭水密性高，管材正常使用壽命可達50年。目前國內已有多家生產廠商，供應各種尺寸直管及管件，應用在自來水管、瓦斯管、污水管、給排水管、化學輸送管等領域。北水處使用HDPE管作為自來水管材，約有10年歷史，多使用於北投磺區及陽明山高地區，取代傳統DIP管，延長配水管使用壽命，減少修漏情形，提供更佳供水品質。

聚乙烯(PE)是常見的熱塑性塑膠材料，它具有優越的耐腐蝕性及耐候性，於日常生活中常用來作為聚乙烯塑膠袋、塑膠瓶、電線電纜被覆材料、管材等。依照ASTM D1248之定義聚乙烯依其材質密度可分為高密度、中密度及低密度三種不同種類，如表4-7所示。

表4-7 PE種類及其材料密度範圍(ASTM D1248)

聚乙烯種類	標稱密度(Nominal Density)
LDPE	0.91~0.925 g/cm ³
MDPE	0.926~0.94 g/cm ³
HDPE	0.941~0.965 g/cm ³

製造管材方面一般採用HDPE，其一般適用於受內壓之輸送管路，如化工廠液體輸送管路，以及受內、外壓或真空壓之管路，如自來水管、瓦斯輸送管、污水排放管、灌溉給水用管、抽水系統等，甚至可作為輸送礦砂、煤灰及泥漿之用，依ISO4427(自來水用PE管)規定，自來水用管為藍色管或

黑色管加藍色線條，其中各種抗氧化劑、色料、抗紫外線劑等添加物，需於PE原料生產過程中加入形成混合物(compounds)，以製造符合PE100、PE80級數規定之PE原料，此種原料製造之HDPE管才能符合ISO4427各項規定；目前國內部分HDPE管製造廠，係以白色PE原料(natural，即PE原料原始顏色)於製管過程中，添加色料染色，這種生產管材方式並不符合ISO4427規定，長期使用可能會降低長期抗壓能力(抗蠕變能力)、抗環境應力及縮短使用壽命，因此在選用HDPE管時，應規定其製造原料必須符合ISO4427，色料等添加物必須於PE原料生產時即已混合，並以此PE原料來製造HDPE管，以確保管材品質。

HDPE管具有以下優點與特性：

1. 使用壽命達50年以上：經ISO國際認證機構與美國ASTM的測試報告，HDPE管在正常使用下有50年以上壽命，較一般管材優異。
2. 不具毒性：HDPE管是以聚乙烯單體 C_2H_4 (碳、氫)加壓擠出而成，無任何重金屬添加物與化學安定劑，管材完全不具毒性。
3. 高韌性、耐強震：HDPE管具柔軟且堅韌材質特性，兼具金屬管與橡皮管雙重優點，可耐強震、重壓、土層扭曲等災害。
4. 質輕易搬運：密度 $0.95\sim 0.96g/cm^3$ ，重量比水還輕，搬運施工輕便快速，降低搬運及按裝費用。
5. 抗紫外線照射：除透明無色管外，添加2~2.5%碳黑(Carbon black)與其他色料之HDPE管，皆可抵抗紫外線的照射，延長使用壽命。
6. 溫度使用範圍大：HDPE管安全使用範圍為攝氏60度至-60度間，可抵抗任何惡劣氣候變化。
7. 耐衝擊力強：HDPE管具有拉伸率700%以上，經重物直接壓過管身亦不破裂。

8. 可撓性極佳：HDPE管可撓性佳，易於彎曲，在不加熱情況下可彎曲配管，小管徑更可製成盤管，除降低接頭使用成本及按裝費用外，亦可以管中管方式取代舊有配水管。
9. 抗腐蝕性特優：HDPE管活性極低，目前世界上尚無任何的黏著劑可接合它，可見其抗化學質性特優，適合用於實驗室、工廠與工業區的污水排放，土壤中存在之化學物質，不會對HDPE管產生任何分解作用。
10. 耐磨性佳：HDPE管之耐磨性為鋼管4倍，可作為泥漿輸送管。耐磨性佳使HDPE管具更長使用壽命及更佳經濟性。
11. 低摩擦係數、高輸送量：HDPE管內部光滑度及非黏附性優於其他管種，不易附著任何物質，其曼寧係數為0.09，相同管徑下其輸送水量為金屬管的1.3倍。

4.4.2 高密度聚乙烯(HDPE)管材施工方式簡介

目前市面上HDPE管接合方式很多，茲舉例北水處較常用之方式如下：

1. 熱熔對接法：

適用16mm至1600mm口徑，其特點為剛性連接、不可拆裝、抗拉力，且接頭耐壓、抗拉力比原母管還強，降低了接頭處滲漏的可能性，是最省施工成本的接合方式，無論在工廠或現場均可使用此種接合方式。熱熔焊接斷面很小，焊接邊緣不會干擾管道，管道內部截面也沒有任何變化。對焊接面容許的厚度近乎與管壁厚度一樣，所以也不浪費管材，管線長度和彎頭連接處都能得到充分利用，施工步驟如下(圖4-92)：

- (1)先將兩截欲接合之管線固定於熔接機台上，並以乾淨布料沾染稀釋酒精，擦拭欲接合的兩管接合面。

- (2)利用整平刀將兩端管面修整至平整。
- (3)將電熱板置於兩接合面中間加熱，按規定壓力加壓，直至兩端均出現規定熔珠尺寸為止。
- (4)退出電熱板將兩接合面迅速接在一起，再施以漸進的壓力直至熔珠形成，然後保持壓力至接合處冷卻至規定時間到達為止。



圖4-92 熱熔對接法施工示意圖

2. 電焊套熔接法：

電焊套熔接法是一種非常精密確實的接合方式，適用於安全性要求極高的瓦斯管路、滲漏管線快速修復、分水鞍裝置、高壓管路施工，適用16mm至400mm口徑之HDPE管。其原理係將內含電阻線絲的高密度聚乙烯材質接頭，通以直流電流至電焊套的正負兩極，將電阻絲導熱後使接頭材質與接合管面合為一體。目前電焊套施工已進步至數位條碼控制，施工時以電焊機掃瞄附於電焊套上之條碼，將自動輸入各項融接數據，包括融接及冷卻時間均由電腦自動控制，可確保融接品質。其施工步驟如下(圖4-93)：

- (1)將待銜接之HDPE管表面以專用刮管器或以丙酮去除油污及氧化膜。
- (2)將管線接合端置入電焊套內，並調整其插入深度至中點，確認無誤後，啟動電源，開始進行熔接程序。
- (3)電熔時間到達後，切斷電源，讓管與電焊套保持平行並依規定時間

冷卻。



圖4-93 電套銲熔接法施工示意圖

3. 機械式對接法(法蘭接頭，圖5-94)：

適用於HDPE管與其他管材(DIP、鋼管等)銜接用，施工步驟如下：

- (1)保留適當作業空間，並清潔待接之兩端法蘭管面及管內部異物。
- (2)將管放平，並將法蘭定位於固定端後約5-10公分，然後置入止水橡膠於兩管中間。
- (3)將固定螺栓插入兩法蘭固定孔內，套上螺帽後以平均鎖緊方式，連接兩法蘭面至完全閉合。
- (4)檢查所有螺栓之鎖緊程度及止水橡膠環的確實定位。



圖4-94 法蘭機械接頭接法施工示意圖

4.4.3 高密度聚乙烯(HDPE)管材施工案例介紹

1. 北投陽金公路(小觀音配水池至竹子湖派出所)管線抽換工程

為改善陽明山高地區管線漏、竊水問題，提升管網運作績效，2004年10月北水處推動執行「陽明山、北投、天母高地區管線汰換計畫」，其中供應高地區用水最主要之水源為鹿角坑水源，係經由加壓站將水分別經陽金公路送至中正池及經中湖戰備道送至陽明山第一配水池。本工程即為汰換陽金公路小觀音配水池至竹仔湖派出所路段舊有自來水管線。舊管線係1984年埋設之300mm延性鑄鐵管(DIP)，雖尚未達到使用年限，然本路段係硫磺充沛之區域(接近大、小油坑硫磺景觀區)，管線已嚴重腐蝕，時有爆管漏水情形，造成鹿角坑出水量居高不下，增加自來水處供水成本，故需提前汰換。

因本工程施工地點位於北投陽金公路上，施工過程受天候影響至鉅，HDPE管熱熔對接及電焊套施工，遇雨天即無法作業，本案施工路段半年以上為陰雨綿綿天候，工期大受影響，這也是HDPE管施工先天上受限制且尚待克服之處。另外於山區道路施工，往往柏油鋪面以下即為岩石，必須先破碎再挖除，亦為本工程施工困難之處。本工程完工後大幅改善鹿角坑水源出水量，除確保山區用水無虞，更因減少加壓站操作，達到節能減碳之目的，施工過程如圖4-95～圖4-99。



圖4-95 管溝岩方破碎打除



圖4-96 管溝外HDPE管熱熔對接施工



圖4-97 管溝內HDPE管熱熔對接施工



圖4-98 HDPE管熱熔對接施工完成



圖4-99 HDPE管安裝完成情形

2. 文山區老泉街HDPE管線辦理用戶接水

因HDPE管材具有韌性，故會隨壓力變化使管線膨脹或收縮，故需以專用之鞍帶分水栓施工，又HDPE管亦無消防丁字管件，故北水處施工時以法蘭接頭預留一段DIP直管，以利連接用戶給水管與消防栓等設備，但如遇用戶申請新設管線時，或因原預留管線相距甚遠，導致申請接水費大增，造成民怨與抗議事件。

因HDPE管專用之鞍帶分水栓非北水處常備用料，故以專案方式採購1組進行安裝，其施工過程如圖4-100～圖4-102。



圖4-100 管溝開挖至HDPE管並安裝鞍帶分水栓



圖4-101 電熔加熱鞍帶分水栓



圖4-102 鞍帶分水栓鑽孔及給水管件安裝

4.4.4 高密度聚乙烯(HDPE)管材採用建議

由新北投、陽明山等磺區修漏及汰換管線之經驗，許多管線未達使用年限即已不堪使用，究其原因，即因金屬管材於磺區極易腐蝕，經研究高密度聚乙烯管(HDPE)優越的抗腐蝕性、耐酸鹼性及耐候性，非常適用於磺區等金屬管線易腐蝕之區域，另HDPE管搬運輕便且施工方法單純，亦適用於地勢陡峭、道路狹小之高地區；又高腐蝕性之土壤並非僅限於磺區，建議北水處於管線施工時配合進行土壤調查，建立供水轄區內土壤腐蝕性評估資料，並標註於管線圖資系統上，以利後續設計及施工單位作為選擇自來水管材或防蝕保護措施之參考。

另HDPE管係塑膠類管材，埋設後無法以磁性定位設備檢測管線位置，故需加強竣工圖繪製管理機制，於重要分歧點及管線沿線適當位置，埋設電子標示裝置，方便後續維護管理作業，而HDPE管施工時遇雨即無法進行熱熔作業，因此施工進度受天候影響很大，於安排施工計畫時應考量此項因素，避免承商承攬後遲遲無法進場施工，延誤整體進度。

HDPE管於歐美國家使用越來越普遍，各種管件陸續被發展出來，例如HDPE管專用閥類、塑膠法蘭片等，且HDPE管維修需要較專業技術、材料及機具，未來均可進一步探討及應用。

4.5 小結

1.耐震NS接頭：由於臺灣道路下方地下管線眾多且複雜，施作空間有限，經由本次試辦實際現場施工埋設所獲取之經驗發現，耐震NS接頭施工性於初期由於施工人員對於工法、工序及步驟尚屬摸索階段，因此耗費較多時間，惟一旦熟悉後，其所需之時間甚至少於傳統K型鑄鐵管螺栓機械式接合方式，然NS型直管及管件目前均僅能仰賴進口，因此價格高出傳統K型鑄鐵管甚多，日後若能在地生產價格應可大幅降低，加以其優異的耐震

性，其實用性應可與K型鑄鐵管相抗衡，短期為降低施作成本，甚至可考量採用NS型直管及K型另件之複合式工法進行進一步的試辦。

2.小口徑波狀管：北水處給水管部分已全面採用，除減少彎頭數及節省施工時間外，並節省整體材料成本，如遇障礙物或排水側溝時，亦可利用其波狀部之可撓性與搭配過溝蓋版方式穿越。

3.大口徑波狀管：其具有提升施工效率、適用各種管線障礙空間、減少接頭數降低漏水率以及提升管線耐震能力等優異性能，然價格昂貴，建議使用時機為1.配合窰井人孔開挖管線遷移、2.新舊管銜接偏移過大時、3.需穿越排水側溝下方、4.遇管障經主辦工程司同意者。

4.施工遭遇雨水箱涵：當管線施工遭遇雨水箱涵結構物或進行管線遷移改善部分，後續建議口徑400mm以上管線可以短管推進方式進行改善，口徑300mm以下之管線可採用「管線與箱涵頂版共構」與大口徑波狀管銜接之方式進行遷移，確保供水管網健全。

5.高密度聚乙烯管(HDPE)：因其具有優越的抗腐蝕性、耐酸鹼性及耐候性，非常適用於磺區等金屬管線易腐蝕之區域，另管材搬運輕便且施工方法單純，亦適用於地勢陡峭、道路狹小之山區高地，作為配水幹管。

第五章 DIP管材優化之推動

CNS 13273 「延性鑄鐵管及管件內面用環氧樹脂粉體塗裝」關於粉體塗裝之檢驗項目有：塗膜外觀、塗膜附著性、塗膜之硬化程度及塗膜厚度，惟欠缺對塗膜的附著強度檢驗方式。為提升粉體塗裝品質，避免粉體於管網中剝落造成堵塞水表，建議採購規範應增訂粉體塗裝拉拔檢驗項目。

北水處供水轄區位於軟弱土層之臺北盆地，地震波傳遞易因盆地效應與場址效應產生放大特性，因此北水處為提升配水管耐震能力已於去年向日本引進耐震管材(DIP NS型接頭)。東區分處執行中之北水處首標NS汰換小區，係依北市府2016年9月所公告之土壤液化潛勢圖之高液化潛勢範圍做為選址依據。經查當時公告之土壤液化潛勢圖屬初級圖資，因精度不足且未考量地下水位及黏性土壤等特性，使該圖資較不能代表實際液化潛勢情形。北市府2018年3月最新公告之土壤液化潛勢圖(中級圖資)，經與該小區進行套繪，發現該小區非全部屬高液化潛勢範圍，耐震管材選址依據需要更通盤的考量。

各國水公司年度資源有限，無法在很短的時間內全部更新為耐震管線。尤其NS材料價格是K型的4-5倍，如此昂貴的管材，對於埋設位置須更整體規劃藍圖。建議以小區當作汰換單元，內容涵蓋土壤液化潛勢(中級圖資)、場址效應、盆地效應、管線易損性及區塊重要性等，據以製做出配水管網損害風險地圖(risk map)，建立耐震管材的汰換規劃藍圖。

5.1 DIP粉體塗裝規範修訂

5.1.1 拉拔試驗允收強度制訂

鑑於粉體塗裝拉拔試驗國際僅有試驗方法，惟未訂定驗收強度得以依循。本研究以美國材料試驗協會ASTM D4541試驗方法及其規定之Type III

儀器進行相關試驗，共累計356筆拉拔試驗數據，並對數據進行統計分析，從中找出學理上的顯著不良界線，據以訂定驗收之允收強度。由全自動製程直管之拉拔試驗數據中，提取較小的變異數，同時要求手動製程的彎管數據也要符合同樣的小變異數，如此便可提升管件粉體強度，避免內襯脫落。

大體上可採允收「平均強度」及「最低門檻」判定法則推得合理驗收之拉拔強度。「平均強度」原則以區間上界為允收強度，目的要得到超過平均水準的管材。「最低門檻」目的在排除低端管材，希望藉此提升廠商品管。

5.1.2 允收「平均強度」判定法則

「平均強度」考量拉拔強度數據的不確定度，訂定為區間上界強度才能提昇粉體內襯品質。平均強度法是採多組數據取平均，不至於讓少數的試驗誤差而影響驗收的結果。

經了解DIP管件與直管的粉體塗裝製程不同、強度差異很大，故需分開進行統計分析：

1. 管件粉體內襯允收平均強度(圖5-1)

考慮不確定度：95%信賴水準下， \bar{x} 的區間

$$\bar{x} - k \cdot u < \bar{x} < \bar{x} + k \cdot u$$

k為擴充因子，若樣本大於30， $k \doteq 2$

u為標準不確定度， $u = \frac{s}{\sqrt{n}}$ (s為樣本標準差、n為試驗次數)

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{3.65}{\sqrt{299}} = 0.211, k = 1.968$$

$$\text{得 } 10.37 < \bar{x} < 11.20$$

取上界訂為驗收平均拉拔強度標準，建議增訂管件粉體內襯平均拉拔

強度為11.20 MPa。

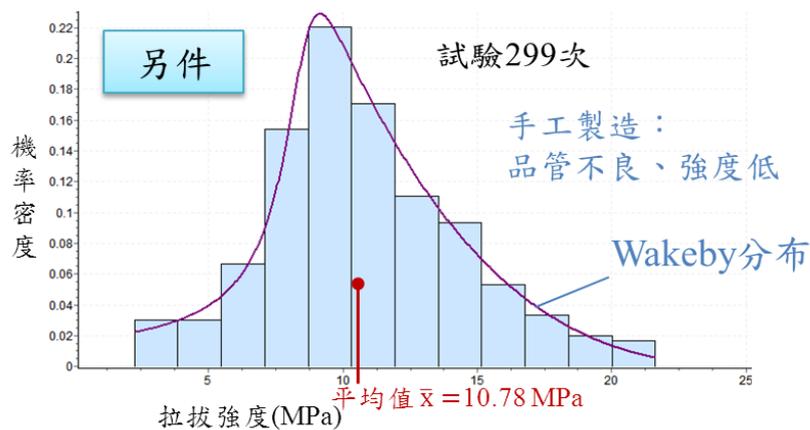


圖5-1 管件的機率密度與拉拔強度圖-平均強度

2. 直管粉體內襯允收平均強度(圖5-2)

考慮不確定度：95%信賴水準下， \bar{x} 的區間

$$\bar{x} - k \cdot u < \bar{x} < \bar{x} + k \cdot u$$

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{3.99}{\sqrt{40}} = 0.631, \quad k = 2.023 \text{ (s為樣本標準差、n為試驗次數)}$$

$$\text{得 } 17.71 < \bar{x} < 20.27 \text{ (MPa)}$$

因區間太寬且直管粉體內襯品質已不差，故不挑選上界當做驗收標準，採試驗所得的平均拉拔強度訂為驗收標準，建議增訂直管粉體內襯平均拉拔強度為18.99 MPa。

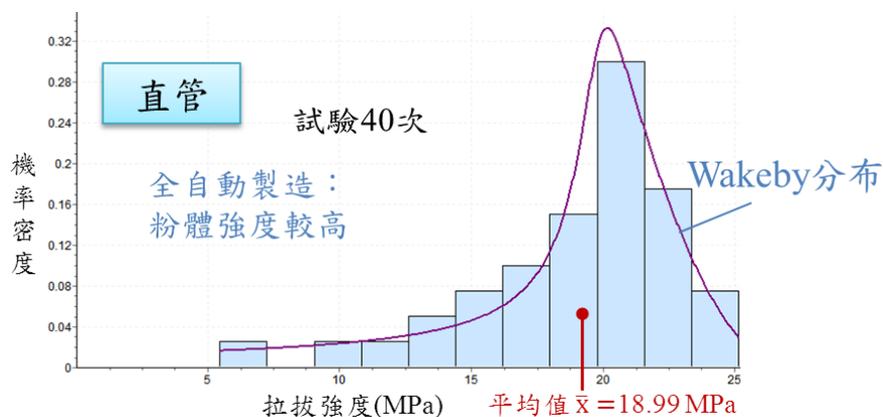


圖5-2 直管的機率密度與拉拔強度圖-平均強度

3. 採購規範建議

每只抽驗試體剖半後，各做3個點拉拔強度，得到6點的拉拔強度後，去掉最低值。5個點平均須高於允收平均強度(管件11.2 MPa、直管18.99 MPa)。

5.1.3 允收「最低門檻」強度法則

「最低門檻」法則：排除最差10%的內襯，管件與直管製程、強度相異，需分開統計分析：

1. 管件粉體內襯最低門檻(圖5-3)

由299次試驗結果為「偏態分布」，故對稱的常態分佈判定方式(1個標準差：單尾外側機率15.85%、2個標準差：機率2.25%)不適用於粉體內襯。計算最差10%的拉拔強度落在6.5 MPa。

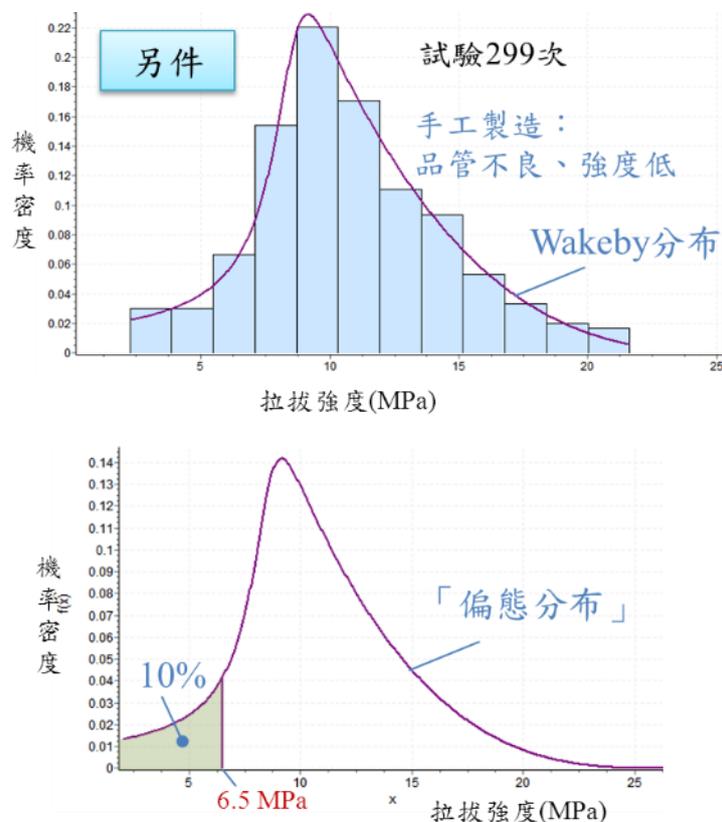


圖5-3 管件的機率密度與拉拔強度圖-最低強度

2. 直粉體內襯最低門檻(圖5-4)

由40次試驗結果為「偏態分布」，算最差10%的拉拔強度落在13 MPa。

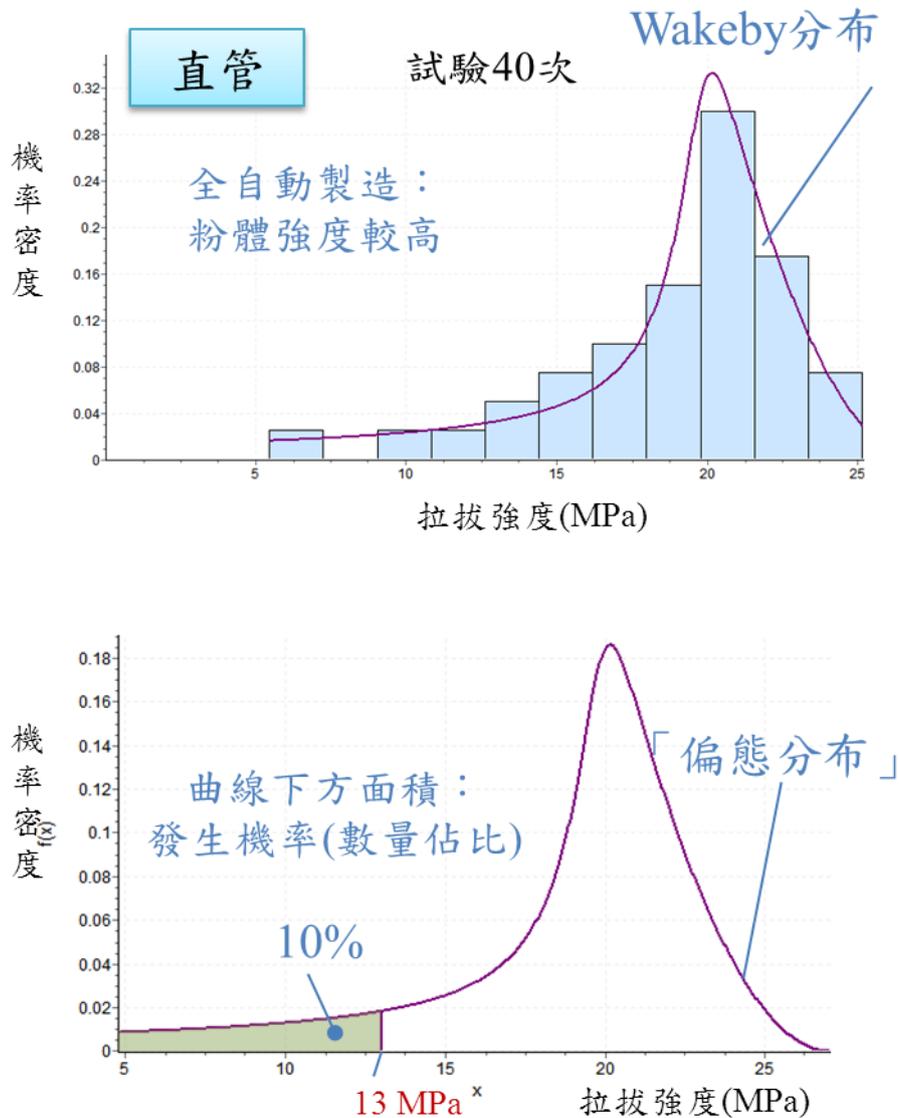


圖5-4 直管的機率密度與拉拔強度圖-最低強度

3. 採購規範建議

每只抽驗試體剖半後，各做3個點拉拔強度，得到6點的拉拔強度後，去掉最低值。5個點數值須高於允收最低門檻強度(管件6.5 MPa、直管13 MPa)。

5.1.4 粉體內襯規範修訂與鑄鐵廠商交流會議

粉體塗裝拉拔試驗實施初期，不宜訂定太過嚴苛的允收標準，考量最低門檻法則，僅要一點未達標準及認定不合格，做為驗收評判標準似乎過於嚴苛，不適合做為初期推動之驗收標準，經審視後僅採平均強度法做為允收標準之判斷：

- 1.管件部分：研磨及粉體噴塗為人工製程，試驗數值偏低且離散(大都呈現鑄鐵面破壞模式)，95%信賴區間介於10至11 MPa，平均值為10.78 MPa。
- 2.直管部分：研磨及粉體噴塗為機械製程，試驗數值較高且不離散(無出現鑄鐵面破壞模式)，顯示直管粉體品質較優良，95%信賴區間介於17至20 MPa，平均值為18.99 MPa。

北水處於2018年4月11日邀請國內鑄鐵廠商召開「延性鑄鐵直管及管件規範」修訂前協商會議，說明增訂粉體塗裝拉拔驗收事宜。參加廠商普遍認同採購規範增訂粉體塗裝拉拔驗收項目，惟粉體直管目前國內僅一家廠商生產，其他廠商仍在投入生產規劃階段，建議直管驗收強度不宜制訂過高，讓其他有意願投入生產廠商不在高門檻設定下難以投入生產；同時各家廠商也建議須考量儀器誤差及驗收值應取整數等意見。

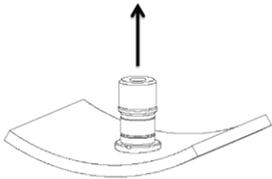
隨後歷經召開多次廠商交流會議，最終拍板定案初期拉拔試驗允收標準如下所示，後續允收標準之建立，則加入每年採購新增試驗值分析檢討次年驗收強度。

- 1.管件部分：驗收強度訂於11 MPa，經現有數據模擬評估不合格率約9%。
- 2.直管部分：考量試驗樣本僅現有產品及鼓勵其他廠商投入生產，考量儀器誤差後驗收強度訂於16 MPa。

允收標準建立之後，即可著手修訂採購規範，因拉拔試驗之驗收標準值需逐年滾動檢討，故將試驗方法及標準載於附錄A，不訂於規範主文中，以利日後規範修訂。附錄A之試驗方法及標準是參考ASTM D4541訂定而成，訂定過程已參考國內TAF實驗室之意見。

拉拔試驗會損傷DIP粉體內襯，屬破壞性試驗，為不增加破壞性試驗樣品數，依原規範規定選取破壞性試驗之剩餘試體進行拉拔試驗。北水處延性鑄鐵直管及管件規範修訂內容如表5-1。

表5-1 延性鑄鐵直管及管件規範修訂內容

項次	修訂條文	修正內容
1	新增十、(四)6	<p>6.管件之內面環氧樹脂粉體塗裝拉拔試驗，依附錄A「延性鑄鐵管粉體塗裝拉拔試驗之試驗方法及標準」規定辦理，並依十、(四)5.測試方法所取樣之剩餘管材做為拉拔試驗試體。</p> 
2	新增附錄A	附錄A-延性鑄鐵管粉體塗裝拉拔試驗之試驗方法及標準，請詳附件所示

因拉拔試驗屬新增試驗，為使國內鑄鐵廠商能了解試驗的方法，北水處處長及副處長已多次分別率員至國內各鑄鐵廠商進行交流及說明(圖5-5至5-7)，經交流後綜整各廠商意見如下：

- 1.環氧樹脂粉體內襯之倉儲、吊運、修補及鑽孔...等與傳統水泥內襯均有所差異，北水處將會提出整體配套措施，確保爾後使用粉體管材不致損傷內襯。
- 2.欣冠公司曾委託實驗室以ASTM D4541第2型儀器進行拉拔測試，惟與北水處規範所採第3型儀器不同，由於不同儀器拉拔強度數值不能轉換對照，北水處將擇期至欣冠公司指導第3型儀器之試驗程序，協助該公司了解產品強度值與允收標準值之差異。
- 3.有關北水處所訂之拉拔試驗初期驗收方法及允收標準，經會議說明後，各公司已了解並認同北水處訂定之方法及標準。



圖5-5 興南交流與說明拉拔試驗



圖5-6 錦源交流與說明拉拔試驗



圖5-7 欣冠交流與說明拉拔試驗

依據交流會議意見第2點，北水處已於2018年10月17日至欣冠鑄造股份有限公司指導ASTM D4541第3型儀器之試驗程序，實驗管材有100x45彎頭、150x45彎頭、200x22.5彎頭及300單突緣短管共4只管件，其中將300單突緣

短管一區域進行鑄鐵表面特別加工研磨，做為試驗之對照組，進行實驗的環境溫度為22.8度，濕度27%(圖5-8)。



圖5-8 試驗管材及試驗環境

實驗過程紀錄開始黏膠時間、使用端子型式、拉拔強度及試驗時間。試驗結果簡述如下，總共進行12點拉拔試驗，等待黏膠硬化時間約6小時，排除2個黏膠失敗試驗，其於10點破壞模式屬鑄鐵面破壞(圖5-9)。其中特別加工研磨之拉拔強度高達18.86 MPa，高於其餘未做表面處理之各點強度，如此對照試驗顯示出，表面處理對拉拔強度的影響甚巨。

經過本次至欣冠公司試驗的成果，使得欣冠公司了解自家粉體塗裝的品質良窳，如何在生產製造的過程進行改善，以符合自來水事業的要求，是未來該公司必須挑戰的工作。

100x45彎頭		150x22.5彎頭	
			
10.27 MPa	8.2 MPa	-	-
鑄鐵面破壞	鑄鐵面破壞	鑄鐵面破壞	鑄鐵面破壞

300單承口單突緣短管			
			
18.86 MPa	11.97 MPa	8.73 MPa	8.92 MPa
鑄鐵面破壞	鑄鐵面破壞	鑄鐵面破壞	鑄鐵面破壞

200x22.5彎頭			
			
10.4 MPa	3.1 MPa	12.08 MPa	9.0 MPa
鑄鐵面破壞	黏膠失敗	鑄鐵面破壞	黏膠失敗

圖5-9 欣冠拉拔試驗數據

5.1.5 驗收委託第三方公正實驗室

為求拉拔試驗驗收公正性，應委託專業的TAF實驗室進行試驗，經北水處邀請目前有意願接受委託拉拔試驗的實驗室共7家(表5-1)，其中台灣檢驗科技股份有限公司、美商通用檢驗科技股份有限公司台灣分公司及標準檢驗科技股份有限公司已具有ASTM D4541 TAF認證，完成拉拔儀器購買後即可成為北水處受委託試驗的實驗室。

表5-2 TAF拉拔實驗室

編號	機構名稱	實驗室地址	是否具ASTM D4541的TAF認證	備註
1	儀寶電子股份有限公司	桃園市楊梅區金溪路159巷2號	否	願意辦理TAF增項與購買設備
2	金屬工業研究發展中心	台中市工業區37路25號	否	願意辦理TAF增項與購買設備
3	中華民國自來水協會	台南市永康區洲工街176號	否	願意辦理TAF增項與購買設備
4	台灣檢驗科技股份有限公司	新北市五股區(新北產業園區)五權路35號	是	拉拔設備採購中
5	台灣檢驗科技股份有限公司	台中市台中工業區14路9號	是	
6	美商通用檢驗科技股份有限公司台灣分公司	新北市新莊區幸福東路65號	是	
7	標準檢驗科技股份有限公司	新北市五股區成泰路3段32號	是	拉拔設備採購中

雖ASTM D4541有提供拉拔試驗的方法及儀器，惟為使實驗室試驗結果能符合自來水事業單位的要求，經綜整國內驗室意見後，北水處已制訂「延性鑄鐵管粉體塗裝拉拔試驗之試驗方法及標準」並增訂於北水處「延性鑄鐵直管及管件規範」之附錄A中，提供各家TAF實驗室依循進行拉拔試驗，「延性鑄鐵管粉體塗裝拉拔試驗之試驗方法及標準」內容如下所示：

延性鑄鐵管粉體塗裝拉拔試驗之試驗方法及標準

臺北自來水事業處制訂
增訂日期：107年10月2日

一、試驗儀器及配件

本試驗參考ASTM D4541(Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers) Method C之試驗方法進行粉體塗裝拉拔試驗，試驗器材及配件如下。

- (一) 拉拔設備：須使用ASTM D 4541 Method C之TYPE III拉拔設備(油壓式自對準黏結力拉拔器 (Hydraulic Self-Alignment Adhesion Tester))。
- (二) 端子(dolly)：拉拔器的測試探頭(依不同待測管口徑選用)。
- (三) 黏膠：最低黏膠強度應達20 MPa以上。

二、試驗步驟

拉拔試驗步驟分為表面處理、黏膠、拉拔器操作及試驗紀錄等過程，每個階段都應審慎進行，稍有不慎都將減損拉拔強度，試驗步驟如下：

- (一) 表面處理：確保待測面清潔、乾燥、無油脂，清潔時需使用不可破壞待測面之方式或溶劑(必要時)；另端子表面須將前次試驗殘膠清潔乾淨。
- (二) 黏膠：依黏膠供應商所提供之黏膠使用方式或說明，將端子黏於待測面上，並紀錄端子型式及黏著時間，待黏膠完全硬化再進行拉拔器操作。黏膠硬化過程應於濕度50%(±5)，溫度23度(±2)之環境下進行，試驗過程不環切粉體表面。
- (三) 拉拔器操作：拉拔器之拉力速度應在1 MPa/s 以下操作，直至端子與待測面分離，此時表頭的讀數即為拉拔強度並紀錄完成試驗時間。
- (四) 試驗紀錄：包含紀錄拉拔強度值與破壞情形描述。
 - 1. 拉拔強度：拉拔器的表頭的讀數(單位：MPa)
 - 2. 破壞情形描述：

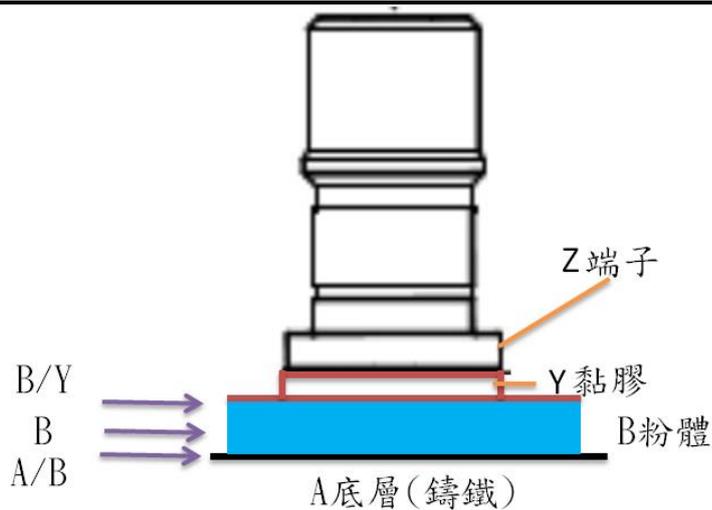


圖1 各層及界面描述

- (1) 鑄鐵面破壞 (Adhesion Failure)：鑄鐵面有裸露情形，破壞面在A/B界面。
- (2) 粉體破壞 (Cohesion Failure)：鑄鐵面未裸露，破壞面在B層或B/Y界面。
- (3) 黏膠破壞(Glue Failure)：端子表面覆蓋黏膠超過25%，破壞面在Y層或Y/Z界面。
- (4) 超過儀器量測(Could not pull off)：拉拔器拉到極值時端子仍未脫落。

三、有效試驗判定與允收標準

發生破壞情形描述(1)(2)且端子表面覆蓋率超過75%及破壞情形描述(4)時，均視為有效試驗。發生破壞情形描述(3)且黏膠佔比超過25%時，忽略該次試驗結果，且應於同一個試體補做試驗，惟當拉拔強度已大於黏膠標稱強度時，可視為有效試驗。

每件抽驗試體剖半後，各獲取3點有效試驗，得6點有效數據並去除最低值，由5點有效數據計算平均拉拔強度值為最後試驗結果，大於等於表1允收標準時，該只抽驗試體試驗結果符合規定，否則不符合規定。

表1 拉拔試驗允收標準

項目 種類	5點拉拔平均值(MPa)
直管	16
另件	11

5.1.6 雙水分享交流

提供更安全更佳的水質一直是自來水事業共同的目標，台水公司近幾年也在推動粉體管試辦計畫，對於初期推動的過程也同樣遭遇與北水處相同的挑戰，如何確保所埋設的粉體管塗裝品質是優良的，能在管網通水30至40年都不脫落，持續保護鑄鐵管避免鏽蝕，是雙水共同的課題。為謀臺灣自來水事業最大利益，北水處主動於2018年10月1日由時科長率員前往台水公司總管理處針對粉體塗裝拉拔試驗進行交流與說明，深獲該公司認同並研議於材料規範增訂相關試驗(圖5-10)。台水公司亦於2018年10月11日召開延性鑄鐵管內面採環氧樹脂粉體塗裝第2次座談會，邀請北水處、國內各鑄鐵廠商及粉體塗料生產廠商，會議除決議於規範增訂拉拔試驗外，並表明後續將擴大採購之決心及政策，雙水共同攜手合作共同打開市場需求，訂定相同的試驗規範，將有助於推動粉體直管政策，國內鑄鐵廠商因自來水事業持續開出需求，廠商才有足夠誘因去做產線的開發。



圖5-10 2018年10月1日雙水交流情形

5.2 管材倉儲品質確保

環氧樹脂粉體塗料，若受紫外線照射容易發生氧化並促使材質劣化，因此DIP環氧樹脂粉體內襯應避免直接日曬，最好能放置於具有加蓋屋頂之倉儲環境。

現行北水處採購規範對於管材封口規定為「所有口徑直管及管件，其管頭、管尾應以塑膠封蓋(厚1mm以上)或自粘性塑膠貼布或美耐板(厚3mm以上)，將開口各端封包，但600mm以上口徑直管，管尾封口材料應用美耐板」。此項規定主要是避免塗層劣化並減少飛塵或異物附著於內壁。

有關規範對於封口規定，廠商具選擇性可採塑膠封蓋、自粘性塑膠貼布或美耐板。廠商為節省成本都以自粘性塑膠貼布封口，此封口的缺點是一旦自粘性塑膠貼布破裂，現場倉儲人員難以修補，使粉體直接曝曬於陽光下，造成粉體塗裝的劣化(圖5-11)。



圖5-11 自粘性塑膠貼布破裂難以修補

為改善粉體管封口破裂無法修補，造成粉體曝露在太陽光下的問題，本研究建議參照日本NS管的封口方式，以塑膠蓋(厚2mm以上)進行封口，單一口徑之塑膠蓋可以適用於管頭與管尾，管頭採塑膠蓋塞入方式，管尾採塑膠蓋包覆管尾方式(圖5-12)。



圖5-12 蓋子進行封口避免粉體塗裝劣化

為妥善保持粉體品質，粉體管從出廠到現地施作埋管，落實管材倉儲管理先進先出原則，確實掌控材料之生產及使用時間，勿因儲存時間過長造成品質變異，否則會減損管材使用壽命；管材搬運時不可大力撞擊或摔落，必須以布條吊掛搬運，務使搬運時受力平均，以免造成管材內襯破裂受損。

5.3 施工過程管材操作

5.3.1 施工管理

施工廠商應遵守以下事項，妥善並謹慎地處理管材，避免管材出現變形、塗裝受損、砂漿內襯龜裂剝離等情形發生。

1. 施工廠商應使用防護材料進行管材的堆放與搬運，避免管體及塗裝損傷。
2. 施工廠商在吊掛管材時，應在管材兩端安裝吊具，進行雙點式吊掛。但若該管材不適用雙點式吊掛時，則不在此限。此外，為了保護管材塗裝，吊具應使用尼龍繩或用有橡膠包覆的纜繩(圖5-13)。
3. 施工廠商應謹慎吊掛管材並緩緩搬運，避免拖拉管材，或以滾動方式移動管材。

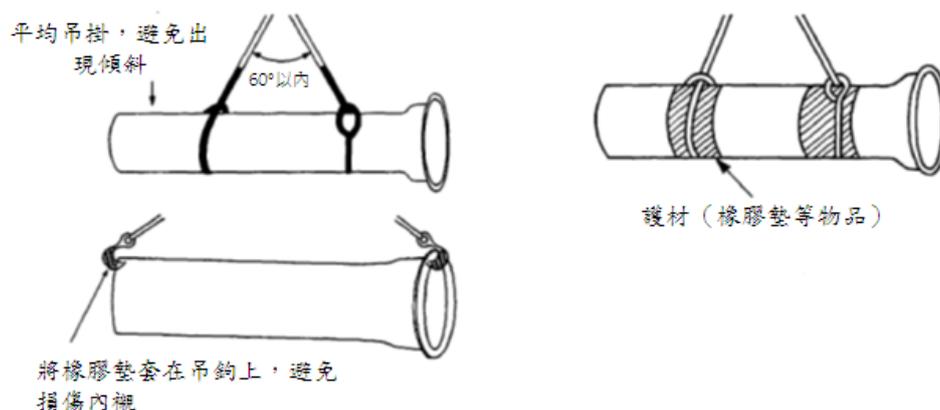
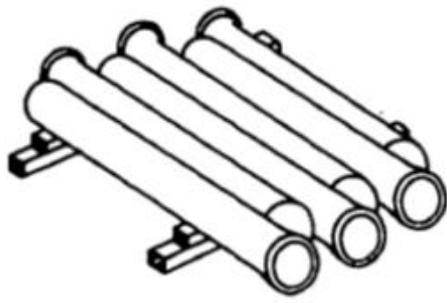
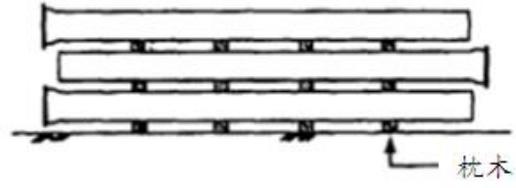


圖5-13 管材吊掛方式

4. 施工廠商於搬運及堆放時不可直接踏在管材的塗裝面上。
5. 施工廠商應將管材置於固定角材等枕木上保存，避免損傷管材內外兩面的塗裝。此外，應放置卡榫等保護措施，避免管材滾動。
6. 一般是以尼龍繩固定前後兩處吊掛，除了要注意管材的重心位置外，尚應使用護材(橡膠墊等物品)，避免吊具損傷管材外部或內襯。
7. 在管材下方鋪放枕木，盡量將承口與插口交錯堆疊，並避免承口法蘭損傷旁邊的管材。此外，務必在兩端放置卡榫，避免管材滑動(圖5-14)。



(a) 大口徑



(b) 中、小口徑



圖5-14 管材放置方式

5.3.2 施工鑽孔剝落問題探討

電動鑽孔機與粉體鑽頭進行粉體塗裝管的鑽孔測試(圖5-15)。粉體鑽頭比水泥鑽頭是更銳角(尖)的鑽頭，鑽孔結果要不傷及內襯及鑽孔周遭無內襯脫落才是適當的工具組合。



圖5-15 電動鑽孔機與粉體鑽頭

浦城街4巷現場鑽孔測試，進行口徑200mm DIP環氧樹脂粉體管試辦鞍帶分水栓安裝作業，以電動鑽孔機及粉體專用鑽頭測試，鑽孔結果孔徑斷面完整，無內襯剝離情形，粉屑呈細條狀(如圖5-16)，故採電動鑽孔機搭配粉體鑽頭是適當的機具搭配。



圖5-16 粉體塗裝管20mm給水鞍帶鑽孔測試

上述電動鑽孔機搭配粉體鑽頭是適合的粉體鑽孔工具，但價格昂貴且廠商必須另外購買。北水處廠商安裝鞍帶分栓所使用之機具為十字鑽孔機與角度較鈍之水泥鑽頭，且十字鑽孔機是用人工操作非電動，旋轉速度較慢(圖5-17)。推廣粉體直管初期若規定水管承裝商必須使用昂貴電動鑽孔機搭配粉體鑽頭勢必會造成廠商的成本負擔，為減少廠商投入成本，本研究尋找其他可行之替代方案。

因粉體是有韌性的塗料，鑽頭要鑽破粉體又不發生鑽孔周遭撐破粉體之情形，鑽頭的角度應該是關鍵而非鑽孔機旋轉的速度，若將水泥的鑽頭磨尖為粉體鑽頭的90度角，或許可以順利鑽破粉體而不發生撐破情形，北水處將另外再進行另一組鑽孔試驗以求驗證，規劃的構想方案如圖5-18。



圖5-17 電動鑽孔機與十字鑽孔機(手動)

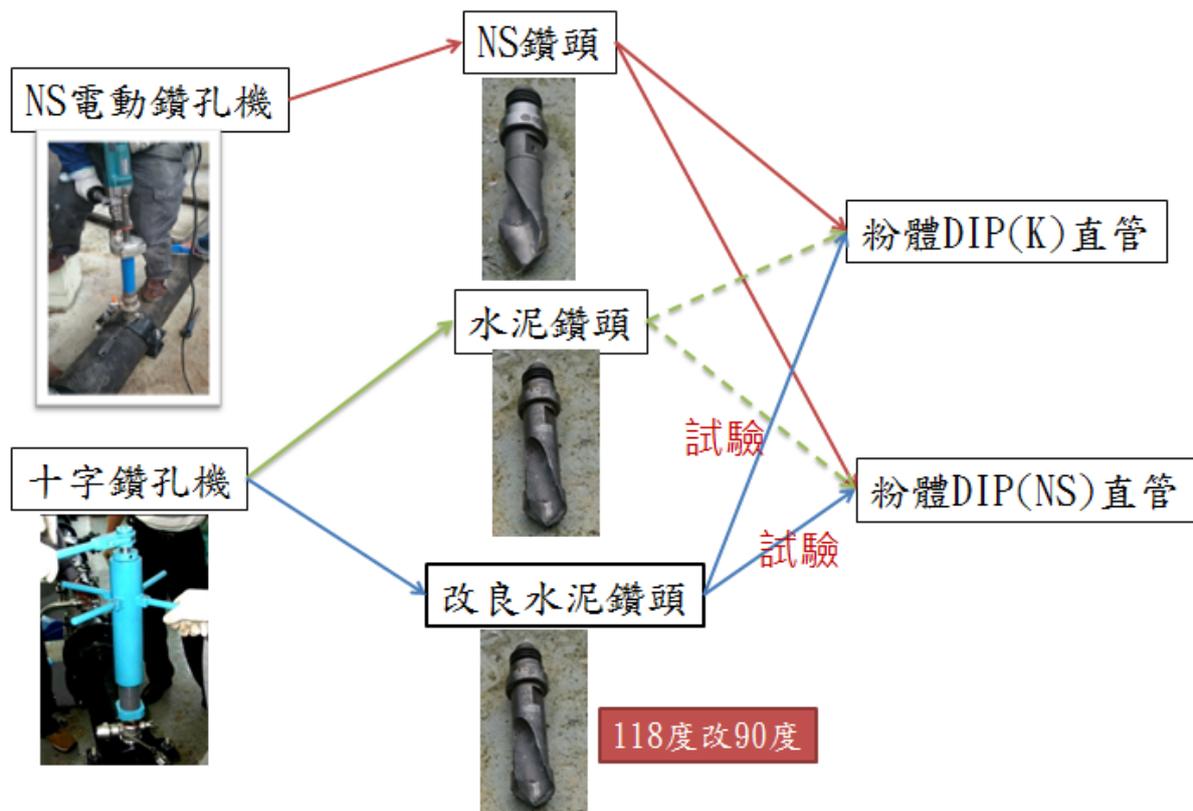


圖5-18 鑽孔試驗的構想

鑽孔試驗之規劃及現場試驗如圖5-20、5-21，試驗所需的管材、鑽孔機具、鑽頭及其他配件如下所示：

1. 鑽孔機：NS電動鑽孔機x1、十字鑽孔機x1
2. 鑽頭：
 - 90度水泥鑽頭20mm x 1、90度水泥鑽頭50mm x 1(由加工廠將118度磨尖為90度鑽頭，如圖5-19)
 - 118度水泥鑽頭20mm x 1
 - 粉體鑽頭20mm x 1、粉體鑽頭50mm x 1(當作試驗的對照組)
3. DIP管：200mm K型粉體直管鑽5孔，200mmNS型直管鑽5孔。
4. 鞍帶：200x20鞍帶x 1及200x50鞍帶x 1



圖5-19 水泥鑽頭加工前後角度



圖5-20 鑽孔規劃示意圖



圖5-21 現場鑽孔試驗

20mm 鑽孔試驗結果概述如下(圖5-22)：

- 以NS電動鑽孔機搭配NS鑽頭的鑽孔結果：無論是國內的粉體與栗本的粉體皆無剝離情形發生。
- 以十字鑽孔機搭配加工改變鑽頭角度為90度的水泥鑽頭，國內的粉體與栗本的粉體皆出現輕微剝離現象。
- 以十字鑽孔機搭配角度為118度的水泥鑽頭，國內的粉體出現輕微剝離，栗本的粉體則出現嚴重剝離現象。

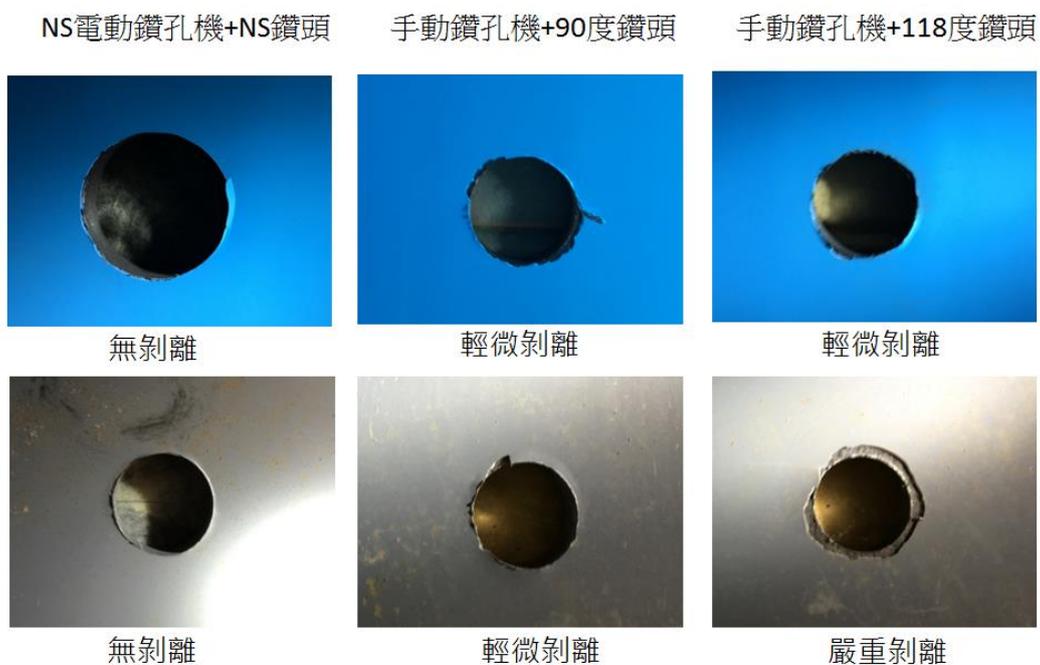


圖5-22 20mm鑽孔試驗結果

由此可知20 mm水泥鑽頭加工改變鑽頭的角度確實可以改善粉體剝離的情形。118度的水泥鑽頭，因角度不夠銳角，粉體鑽孔過程會將粉體撐大，因日本生產之粉體凝聚力(cohesion)較強，較易導致鑽孔周遭粉體剝離，故118度的水泥鑽頭明顯不能用於鑽粉體內襯。

50mm 鑽孔試驗結果概述如下(圖5-23)：

- 以NS電動鑽孔機搭配NS鑽頭的鑽孔結果：無論是國內的粉體與栗本的粉體皆無剝離情形發生。
- 以十字鑽孔機搭配加工改變鑽頭角度為90度的水泥鑽頭，國內的粉體無剝離、栗本的粉體出現輕微的剝離現象，由此可知50 mm水泥鑽頭加工改變鑽頭的角度確實可以改善粉體剝離的情形。

NS電動鑽孔機+NS鑽頭



無剝離

手動鑽孔機+90度鑽頭



無剝離



無剝離



輕微剝離

圖5-23 50mm鑽孔試驗結果

5.3.3 塗層修補問題探討

新店市中央新村北側區段徵收開發工程，為市地重劃區域，短期無住戶，屬通水初期用水量少、供水滯留案例，是適合理設粉體內襯之區域。北水處工程總隊代辦埋設配水管，除擇定試辦埋設長度148公尺之粉體管外，工區內另擇定同樣長度DIP水泥砂漿襯裡管進行對照比較，可進行長期靜置水質測試及施工測試(圖5-24)。

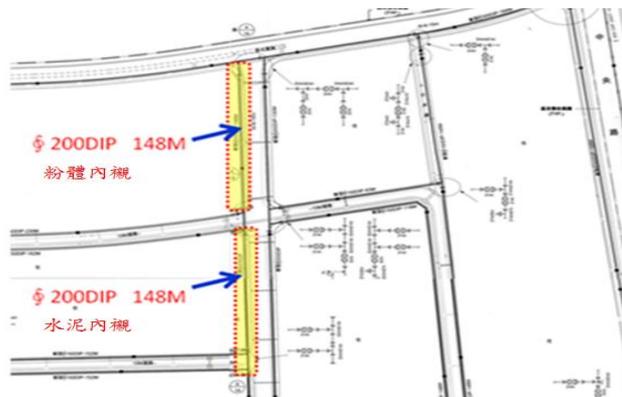


圖5-24 粉體塗裝管切管區域

粉體內襯的切管作業，必須使用修補液塗抹在切口上，避面鑄鐵的銹蝕並保護粉體塗裝。本次現場試驗以栗本鐵工所生產合成樹脂防鏽塗料進行修補，修補後15分鐘左右即固化完成，不致影響埋管施工之工進(如圖5-25)。修補液國內可自行調製不一定要仰賴進口，惟修補液是否對於水質是否有健康風險影響，建議仍須由製造廠商出具相關溶出試驗報告。



圖5-25 粉體塗裝管切管後修補夜修補情形

5.4 耐震管材後續推動

5.4.1 建置配水管網地震損害風險地圖

2016年高雄美濃地震的規模達6.6與1999年南投集集地震的規模7.3相差不多，但卻已在台南市都會區內發生嚴重的土壤液化災害，因此相關地質條件的影響受到政府高度重視，故行政院乃推動執行安家固園計畫，進行新版的土壤液化災害潛勢圖製作。北水處供水範圍除有山腳斷層帶通過之外，臺北盆地因覆蓋沉積砂層且地下水位高，屬高液化災害潛勢區，加上存在許多耐震能力不足之老舊管線，倘若鄰近地區發生強震，臺北盆地因地質條件不佳，容易產生地震波放大效應，而造成輸、配水管線損害。北水處主要輸水幹管目前已採二元系統，具有備援能力，地震後若部份輸水幹管受到損害，透過供水調配機制，仍可確保供水機能。惟地震後若要全面迅速恢復供水，關鍵仍在提升小區管網耐震能力，避免較大地震發生造成管網管線災損嚴重，因耗費較長修漏管線時間較長而影響復水時間。

自來水系統乃影響民生、社會安定與經濟發展之極重要的一環。強震作用下輸、配水管線發生斷裂或滲漏時，將會造成局部地區之民生、消防或醫療用水不足，甚至引致火災蔓延或疾病擴散等二次災害。震後確保自來水系統之持續運作，有賴平時管線維護與汰換。財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心，針對台灣地區自來水事業單位的地震防救災需要，已研發Twater地震風險評估軟體，可根據不同地震情境設定，進行災害性地震事件的境況模擬；尤其是廣泛收集、更新地震災害潛勢圖資(譬如活動斷層分布、地下幾何與活動特性，土壤液化與山崩災害潛勢圖等)，如配合自來水設施與管線的耐震屬性與空間分布等資料庫，可進行地震暴險分析及震災境況模擬，提供平時防災規劃與風險管理所需之多樣化、有效的量化數據。

鑑於延性鑄鐵管NS型耐震接頭，接頭處具較佳之軸向變位及防脫能力，在日本多次大地震驗證之下，幾乎沒發生管線脫接情形。北水處自2017年開始自日本引進NS管，預計於2018年底完成4.2公里之試辦計畫，汰換口徑分為200 mm與300 mm。同時自日本引進NS管安裝方法，在日本技師的教育訓練之下，國內施工廠商已能順利完成安裝。

因NS管國內並無生產，短期必須仰賴日本進口，故購置成本比一般管線金額高出許多，加上每年管線汰換經費有限，故無法一次全面提升供水轄區所有管線之耐震能力。為使經費運用達到最大效益，汰換的選址即相當重要，優先汰換最適小區至關重要。選址的條件將以場址效應、盆地效應、土壤液化潛勢、管線易損性、區塊重要性等因素綜合考量，目前已委託國震中心，借用Twater已收集的各項地震災害潛勢圖資及其專業領域之研究，協助北水處建置（圖5-26）。

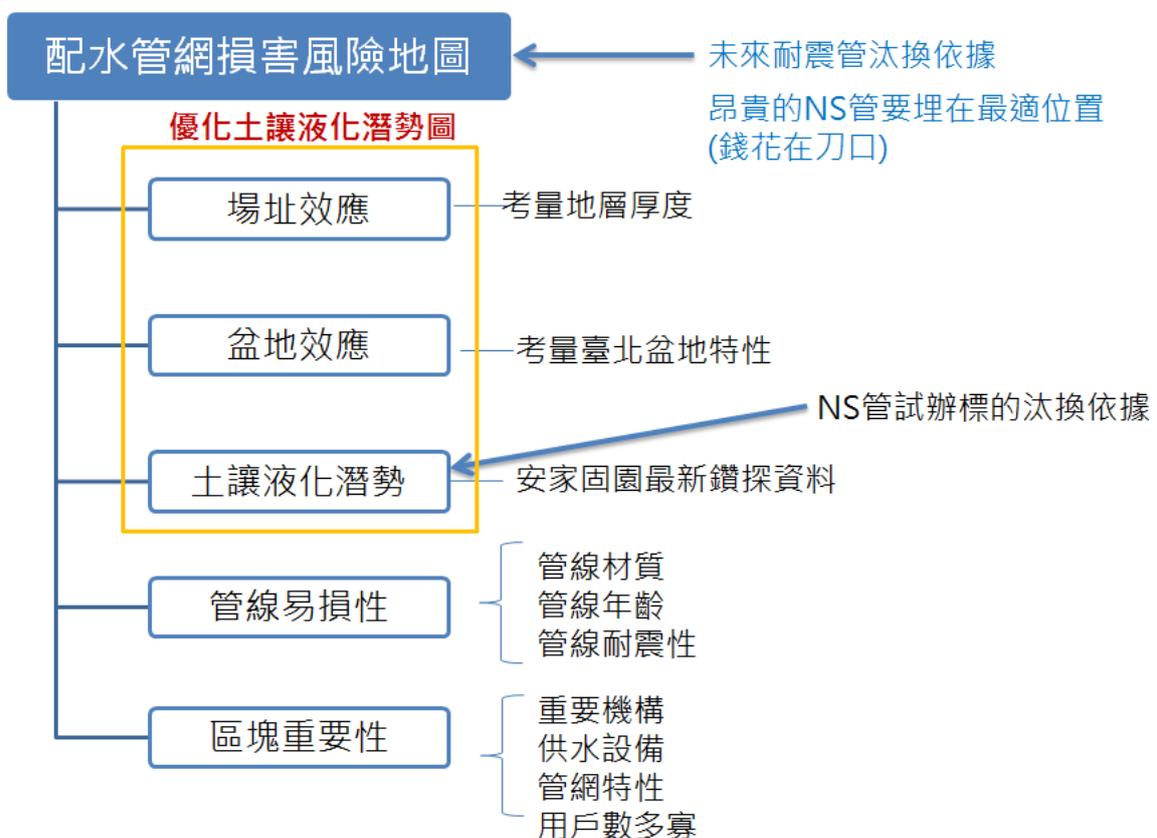


圖5-26 配水管網損害風險地圖涵蓋因素

配水管網損害風險地圖的建置的工作內容概述如下：

1. 繪製土壤液化災害潛勢與場址效應修正等圖資，一般而言，地震災害潛勢包含強烈地表震動，以及活動斷層破裂或土壤液化引致的地表變形。但北水處營運範圍離中央地質調查所公布之第二類活動斷層—山腳斷層的跡線較遠，轄區內不致因山腳斷層錯動而引致具災害性的地表變形；本計畫擬以土壤液化災害潛勢作為主要的地震風險來源，並輔以場址效應修正等因素。臺北市既有的土壤液化災害潛勢圖，包含中央地質調查所和臺北市政府在2016年高雄美濃地震後所公布的初級圖資。但因前述兩種既有圖資所根據的工程鑽孔資料品質不一、分布不均，有必要經過適當的篩選、校正和補充鑽探資料等程序，以最新的知識更新成中級圖資。

本計畫擬參考臺北市內與土壤液化災害潛勢有關的各項資料，包含地質圖、河川流域分布圖、高解析數值地形圖、場址效應微分區圖，以及蒐集臺北市政府與新北市政府執行中之安家固園計畫的階段性成果等，繪製適用的地震災害潛勢圖資。

2. 彙整北水處自來水系統的輸配水管線圖資。包含標的配水管線之耐震屬性(如管徑、管材、接頭型式和管齡)及其空間分布等。與(三)項之圖資套疊，可統計個別供水小區內之標的配水管線的數量和耐震性能(依管材、接頭型式與管齡等)，作為排序時的參考指標之一。

3. 蒐集並整理北水處自來水系統的供水小區劃分圖，以及用水量數據與代表重要性之相關圖資。因每一供水小區於封閉進/出水閘門後成為獨立的供水區塊，可方便日後標的配水管線的汰換工作或震後識別與修復受損管線。因此，本計畫擬整理北水處自來水系統的供水小區劃分圖，作為老舊標的配水管線汰換之優選排序的單元。蒐集並整理個別供水小區內之一般用水量、緊急用水量和關鍵設施用水

量等數據。用水量反映各供水小區內的住宅與營業場所的數量，可作為個別供水小區之重要性指標與排序時的參考。

4. 綜合以上各項圖資，研擬個別供水小區之配水管線耐震汰換順序；另以Twater探討標的配水管線的汰換效益。綜合考慮個別供水小區內之地震災害潛勢、標的配水管線耐震性能和重要性等因素，研擬個別供水小區之配水管線耐震汰換順序。其次，為探討標的配水管線的汰換效益，本計畫擬假設數種可能的地震情境並採用國震中心所研發之Twater，分別推估標的配水管線在汰換前與汰換後可能的管線災損數量，並以管線災損數、修復所需時間和經費等的減少值作為衡量防災與經濟效益的指標(圖5-27)。

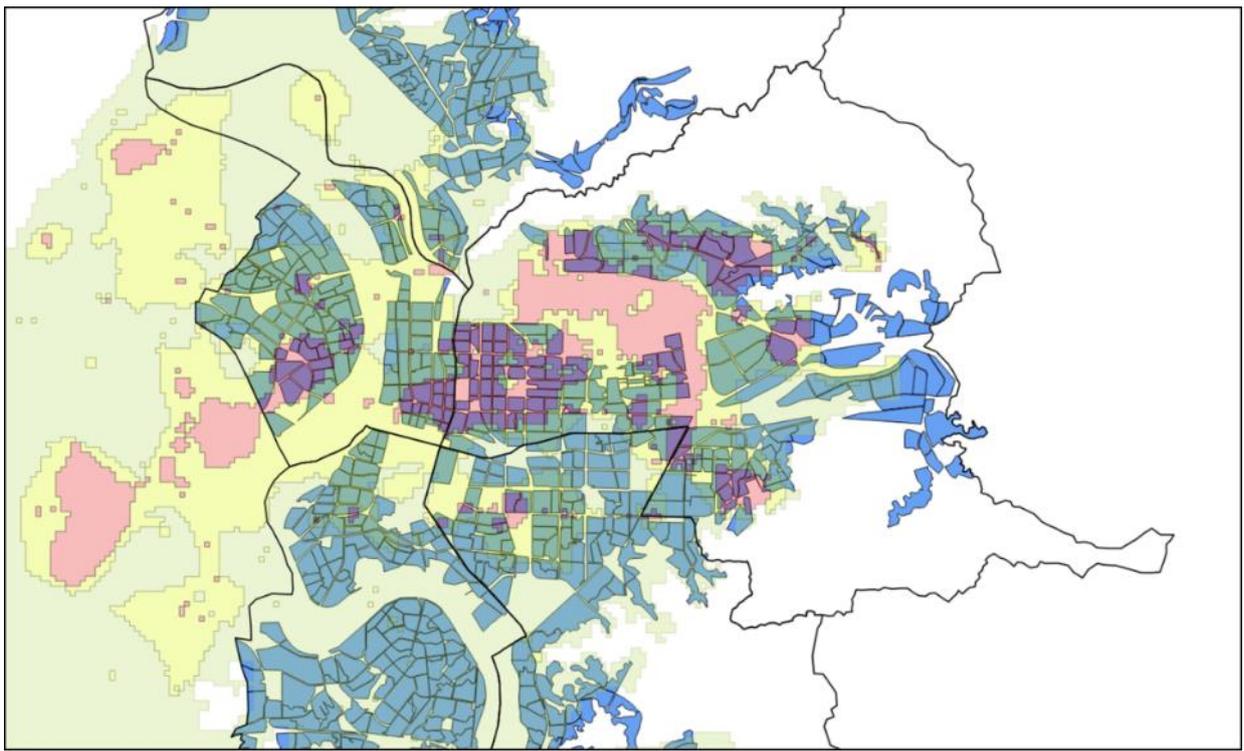


圖5-27 配水管網損害風險地圖示意圖

5.4.2 耐震接頭(NS型)在地化生產

由於延性鑄鐵管(NS型)道路開挖及回填工作與現行延性鑄鐵管(K型)並無不同，惟因NS管接合時須使用油壓千斤頂，故開挖寬度需較K型略寬，整體較K型所增加之施工費約1至2成。至於接頭接合施工方式，依據日本專家表示，標稱管徑250mm以下的NS管是OneTouch的接管作業方式，不需鎖螺栓，因此工率甚至比K型低，因此耐震接頭(NS型)鉸鍊推入接合與延性鑄鐵管(K型)之螺栓鎖固接合在施工方法熟練後所需耗費之時間並無不同，甚至可能更為快速，因此本試辦工程主要差別便在於材料價格，如表5-3，耐震接頭(NS型)材料平均單價約為國內現行延性鑄鐵管(K型)的4.88倍。

表5-3 耐震接頭(NS型) 與延性鑄鐵管(K型)材料差異

編號	材料名稱	單位	北水處K型 (105年底)	日本網站NS型價格		106年北水處NS型決標價	
			單價	單價	單價比	單價	單價比
1	300mmNS直管	M	2,236	8,541	3.82	9,881	4.42
2	200mmNS直管	M	1,444	4,630	3.21	5,174	3.58
3	300*75mmNS丁字(消防栓用)	只	6,550	30,579	4.67	31,133	4.75
4	200*75mmNS丁字(消防栓用)	只	4,006	18,981	4.74	19,365	4.83
5	300mmNS短管1	只	4,700	23,793	5.06	24,268	5.16
6	300mmNS短管2	只	4,187	15,306	3.66	15,659	3.74
7	200mmNS短管1	只	2,778	12,408	4.47	12,675	4.56
8	200mmNS短管2	只	2,176	8,481	3.9	8,676	3.99
9	300*300丁字	只	10,358	48,381	4.67	49,250	4.75
10	300*200丁字	只	9,299	39,072	4.2	39,792	4.28
11	200*200丁字	只	5,778	24,918	4.31	25,411	4.4
12	200*100丁字	只	4,610	19,797	4.29	20,176	4.38
13	300mmNS套管	只	5,326	40,971	7.69	41,695	7.83
14	200mmNS套管	只	3,104	26,769	8.62	27,224	8.77
15	300mmNS45度彎管	只	6,398	26,586	4.16	27,066	4.23
16	200mmNS45度彎管	只	3,431	14,589	4.25	14,881	4.34
	平均				4.73		4.88

NS管進口的材料價格昂貴，不可能在管線耐震化的過程中一直仰賴進口，比照SSP波狀管推行的經驗，NS管必須國內生產，才能降低材料價格，需由試辦開始逐步釋出NS施作長度，國內兩大自來水事業單位(台水公司與北水處)應訂出未來汰換長度計畫，讓製造商看到商機進而投資生產。

因NS管件廠商在投入生產必須投入較多的成本，反觀直管部分投入的

機器單純，建置成本相較生產管線長度較具效益。國內生產初期建議，直管則採用國內生產之NS型直管，NS管件則以K型管件搭配防脫壓圈替代NS管件，以減輕國內鑄鐵廠商初期生產NS管之設備負擔。

上述以K型管件搭配防脫壓圈替代NS管件之構想，因NS管件的接頭是不允許轉角及變位，可採國內外防脫裝置將其裝至K型接頭處，使原有可變位及轉角的柔性接頭變成不可變位及轉角的剛性接頭即可做為替代的方案(圖5-28)。

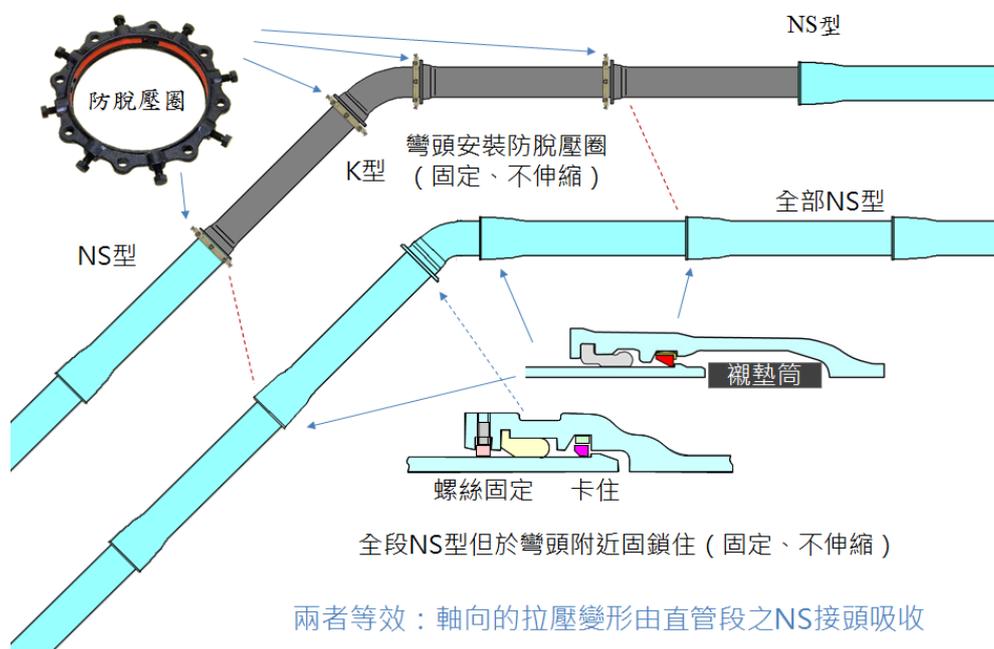


圖5-28 以K型管件搭配防脫壓圈替代NS型管件

NS的接頭防脫力可達3D kN(0.3D 噸)強度，所替代的防脫裝置的防脫力能達多少，後續須進行拉力試驗確認，北水處將計畫進行相關拉力試驗(圖5-29)選擇不同口徑及防脫裝置，求得各方案之防脫力。了解各試驗防脫接頭的防脫力後，再輔以結構性軟體如有限元素軟體建置模型，以比較NS接頭耐震程度的差異，目標找到最佳防脫的裝置做為將來NS管件的替代方案，讓NS管在地化能在台灣早日實現。



ISO 16134 管材耐震分級

性能參數	等級	性能要求
伸長/壓縮率(e) $e=(\text{變形量}/L)\times 100\%$	S-1	$e\geq\pm 1\%$
	S-2	$\pm 0.5\%\leq e<\pm 1\%$
	S-3	$e\leq\pm 0.5\%$
防脫力(F)	A	$F\geq 3d\text{ kN}$
	B	$1.5d\text{ kN}\leq F<3d\text{ kN}$
	C	$0.75d\text{ kN}\leq F<1.5d\text{ kN}$
	D	$F<0.75d\text{ kN}$
接頭最大轉角(θ)	M-1	$\theta\geq\pm 15^\circ$
	M-2	$\pm 7.5^\circ\leq\theta<\pm 15^\circ$
	M-3	$\theta<\pm 7.5^\circ$
L：管長(mm)；d：標稱直徑(mm)		

圖5-29 接頭拉力試驗

NS管的接合方式與K型的接合方式有很大的不同，在台灣以前從未埋設過NS管的經驗，故建置NS的相關規範亦是後續推廣NS管的關鍵之一。NS管要能在地化施作，北水處已建置國內可行之NS相關規範，包含NS型延性鑄鐵管之規劃、設計、單價、材料、施工、維護管理等全套規範文件彙編，內容如下：

- 編製規劃設置原則、設計規範、評估表單及注意事項。
- 編製施工規範、表單及品質管制。
- 編製施工單價及單價分析。
- 提供所需施工機具型式及單價。
- 編製物料規範(含內襯粉體塗裝)、材料檢驗、所需機具及規格標準。
- 編製倉儲管理及工地搬運應注意事項。
- 後續維護管理機制。

5.5 小結

1. **制定拉拔試驗規範：**為提升粉體塗裝品質，避免粉體於管網中剝落造成堵塞水表，採購規範應增訂粉體塗裝拉拔檢驗項目。
2. **第三方公正實驗室：**為求驗收公正性，拉拔試驗應委託TAF實驗室進行試驗，目前有意願接受北水處委託拉拔試驗的實驗室共7家。
3. **雙水分享交流：**粉體直管政策推動，雙水須共同攜手合作共同打開市場需求，訂定相同的試驗規範，國內鑄鐵廠商因自來水事業持續開出需求，廠商才有足夠誘因去做產線的開發
4. **粉體管之封口：**為改善粉體管封口破裂無法修補，造成粉體曝露在太陽光下的問題，本研究建議參照日本NS管的封口方式，以塑膠蓋(厚2mm以上)進行封口。
5. **粉體管之鑽孔：**以十字鑽孔機搭配加工改變鑽頭角度為90度的水泥鑽頭，鑽孔國內粉體剝離情形皆輕微，證實改變鑽頭角度是鑽粉體的關鍵因素。
6. **修補液之檢驗：**修補液國內可自行調製，不一定要仰賴進口，惟修補液是否對於水質是否有健康風險影響，建議仍須由製造廠商出具相關溶出試驗報告。
7. **耐震管材選址與在地化生產：**因NS管國內並無生產，短期必須仰賴日本進口，故購置成本比一般管線金額高出許多，汰換的選址至關重要。為提升國內製造廠商之投資生產意願，以降低管線汰換成本，本研究建議初期導入時，可結合K型管件與防脫壓圈來取代NS管件，鼓勵廠商先投入NS直管之開發。

第六章 結論及建議

6.1 配水管材選用策略

本案研究最終目的，在於從水質、防蝕、耐震、施工四大需求，探討配水管汰換 DIP 管時，面對不同供水環境與風險情形問題，建立一套管材選用可遵循且有效的程序，包括導入新型內襯、接頭型式或材質之不同管材，或配合採用不同技術施工方法，以達成順利完成配水管汰換的目標。

在水質與防蝕的策略探討，主要針對北水處目前使用 DIP 水泥內襯配水管為對象，對於有水質及內部防蝕風險發生之供水環境，建議採用 DIP 粉體內襯管，以提高國內市場需求，若 DIP 粉體內襯管產能提高，達到每年汰換需求時，可考量全面採用。

在耐震的策略方面，本研究主要以依臺北盆地的地質條件作為探討風險情形之對象，並且藉由日本具有耐震實務經驗的 NS 管材與施工技術導入，提升自來水事業單位、監造與施工人員及管材鑄造廠商在管線耐震的意識與技術，在使用耐震管材方面，NS 管在地化生產且價格大幅下降時，將擇適當區域埋設。

對於施工的策略，以北水處供水範圍作為探討風險情形之對象，包括都市人口密集區域及週邊山區，由於都市路口施工環境複雜，為維持自來水管網供水調配正常，建議採用大型不銹鋼波狀管或小型不銹鋼波狀管，配合現地情形施作。而山區自來水配水幹管，若因道路狹小運搬不易，有影響施工品質之慮時，建議可採用 HDPE 管。

相關選用策略臚列如下(表 6-1)，做為自來水規劃設計時之參考。

表6-1 自來水管線選用策略表

供水環境	風險情形	配水管材選用對策
水質：以DIP水泥內襯管作為探討風險情形之對象		
用戶較少之高 地區	若採用DIP水泥內襯管，因管徑小 單位水體內襯表面積較大，長期易 造成pH值超標。	採用DIP粉體內襯管
新開發之重劃區	若採用DIP水泥內襯管，開發時間 長，易造成自來水滯留使pH值超標	採用DIP粉體內襯管
管網系統管末區	若採用DIP水泥內襯管，流速低且 流量小，易造成pH值超標。	採用DIP粉體內襯管
防蝕：以DIP水泥內襯管作為探討風險情形之對象		
水質藍氏指數偏 低區	若採用DIP水泥內襯管，易腐蝕DIP 水泥內襯	採用DIP粉體內襯管
溫泉或 海邊鹽化區	溫泉或海鹽造成DIP外部腐蝕	考量採用DIP包覆PE套膜 或HDPE管
耐震：依臺北盆地的地質條件作為探討風險情形之對象		
高液化潛勢/ 軟弱土層區	放大地震波易造成管線脫接	採用耐震管材
施工：依施工環境作為探討風險情形之對象		
橫越大型箱涵結 構物 (覆土深度不足)	影響供水管網健全與供水品質	採用DIP+大波管上方穿越 (頂板共構) 採用U型或T型DIP短管下方 穿越(推進)
路口等管障區 (DIP管無法銜接)	影響管線汰換施工作業與 管網健全	空間足夠可考量採用大波管 空間不足可考量採用小波管
窰井/人孔開挖管 線繞接	彎頭接頭數增加易增高漏水潛勢	考量採用大波管
山區配水幹管	因道路狹小運搬不易影響 施工品質	考量採用HDPE管

6.2 結論及建議

- 一、北水處使用的球墨鑄鐵管(DIP)材質均與國外產品相似，國內生產技術雖已純熟，惟管壁內襯仍有改善空間，不管是直管水泥砂漿之水質(TDS、pH...)問題，或管件使用粉體塗裝黏著力不足造成脫落問題等，均有賴自來水事業與製造商共同努力予以改善。
- 二、經由水泥內襯鑄鐵管的浸泡靜置試驗及EPANET管網模擬，位於管網末端流量低區域有TDS超標情形，而有85%的管段流速過低現象，形成「水質敏感區」。建議流量較小區域改用粉體內襯，流速較低區域則於管線汰換時設計縮小管徑，搭配定期排水，以降低水質劣化風險。
- 三、CNS 13273「延性鑄鐵管及管件內面用環氧樹脂粉體塗裝」僅檢驗總酚，本研究增加環氧樹脂主要成份雙酚A的檢驗，經採NSF 61試驗方法，並無雙酚A溶出情形。至於是否會溶出其他新興污染物，建議可進一步研究，更能確保用水安全。
- 四、對於管壁內襯使用粉體塗裝，除原有CNS 13273國家標準外，經多次製造廠商交流座談，增訂黏著力拉拔試驗方法，輔導國內TAF實驗室增項檢驗，依據直管與管件分別訂定允收標準值，以避免產生粉體脫落之情形。建議後續可視產品品質逐步提高允收標準。
- 五、目前僅訂初期粉體塗裝允收標準，後續要求更高粉體塗裝品質時，鑄鐵管製造商必定增加生產成本，屆時應適度提高管材單價。
- 六、為確保粉體內襯管材之埋設品質，除加強現場運搬及倉儲管理之外，鑽孔施工更是不容忽視的一環。本研究發現鑽頭的角度是關鍵因素，而非鑽孔機旋轉的速度。將常用鑽頭由118度磨尖為90度角後，搭配手動十字鑽孔機，即可有效避免損傷孔口周邊之內襯粉體。

- 七、日本耐震接頭係唯一歷經大型地震考驗之管材，北水處2016年底開始引進NS型接頭，經由現場實作發現，除採用優良管材之外，更需搭配人員教育訓練、作業工具改良及施工檢核管理，方可確保施工品質及管線耐震性。
- 八、由於NS耐震管材國內並未生產，目前必須仰賴日本進口，購置成本高出數倍，自來水事業應訂定推動策略，以逐步改善國內供水管線之耐震能力。為提升國內製造廠商之投資生產意願，以降低管線汰換成本，本研究建議初期導入NS耐震 管材時，可結合K型管件與防脫壓圈來取代NS管件，以鼓勵廠商先投入NS直管之開發。
- 九、後續耐震管材推動，北水處將委託專業機構進行拉力試驗以驗證前述替代方案之成效。另一方面，建議自來水事業應建立高液化潛勢及軟弱土層區之管網損害風險地圖，作為優先汰換藍圖，以發揮最大經濟效益。
- 十、本研究針對不同的供水環境，提出配水管材選用之建議策略，除前述DIP粉體塗裝管以及NS型耐震管材，對於土壤環境有腐蝕管線疑慮地區，例如新北投及陽明山溫泉礫區，可考量採用DIP包覆PE套膜或採用HDPE管；對於管線施工障礙方面，可視現場狀況，採用大型不銹鋼波狀管穿越或繞接，以健全管網，提高供水穩定性。

參考文獻

1. Steven Folkman. (2012) "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study April 2012." Utah State University, UT.
2. "Buried No Longer—Confronting America's Water Infrastructure Challenge". American Water Works Association (AWWA). 2011. Retrieved 9 May 2017.
3. Weimer, D. (2001), German National Report Water Loss Management and Techniques, International Water Association World Water Congress, Berlin, Germany.
4. 勁園、台科大叢書，機械材料II，第八章 鑄鐵。
5. <https://read01.com/B8yjjk.html>
6. Sumitomo Drive Technologies, Sumitomo Machinery Corporation of America, Cast Iron vs. Ductile Iron Housing Material.
7. http://www.jys-ims.com.tw/08metallographic_software/01_FOD.html
8. 蔡英宏，感應電爐熔鑄能力本位訓練教材-球化處理，行政院勞工委員會職業訓練局，編號：PMF-IFM0506，90年12月。
9. ISO 945-1:2017, Microstructure of cast irons- Part1: Graphite classification by visual analysis.
10. <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=285>
11. <https://hinodesuido.co.jp/Technology/fcd.html>
12. <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~/pmoze/esdep/master/wg18/10200.htm>
13. Robert O'Rourke. (1999). Cast Iron: A Solid Choice for Reducing Gear Noise. September/October 1999 issue of Gear Technology
14. 延性石墨鑄鐵管水泥襯裡加密封塗層可行性評估報告，臺北自來水事業處，103年10月。

15. 台灣自來水公司，澎湖地區送配水管管種最適化探討，中華民國自來水協會，104年5月。
16. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galvanic_series_noble_metals.jpg
17. Laurie S. McNeill. (2001). Iron pipe corrosion in distribution systems. Journal AWWA, July 2001.
18. M68, Water quality in distribution. 2017. Denver, AWWA.
19. Michael Rosenberg Pedersen, 丹麥自來水事業處經營與管理，2014臺丹水資源暨環境教育研討會，臺北。
20. <http://amato.company/en/ductile-iron-pipes/>
21. Wallace T. Miller. (1965). Durability of Cement-Mortar Linings in Cast-Iron Pipe. Journal AWWA, July 1965.
22. Bruce D. Douglas.(1996). Water quality deterioration from corrosion of cement-mortar linings. Journal AWWA, July 1996.
23. <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=520#>
24. EPA United States Environmental Protection Agency. (2002). Permeation and leaching of linings. 1200 Pennsylvania Ave., NW Washington DC 20004, August 2002.
25. E.J. Mirjam Blokker. (2013). Health Implications of PAH Release from Coated Cast Iron Drinking Water Distribution Systems in the Netherlands. Environmental Health Perspectives. Vol. 121, May 2013.
26. <https://www.unitracc.com/aktuelles/artikel/the-story-of-drinking-water-systems-through-the-centuries>
27. https://en.wikipedia.org/wiki/Ductile_iron_pipe#/media/File:DuctileIronConcreteLined.jpg
28. Water Research Foundation and Drinking Water Inspectorate. (2010). Impacts of lining materials on water quality
29. Ryan Pierce. (2009). Impact of an Epoxy Pipe Lining Material on Distribution System Water Quality. Thesis of Master Degree of Virginia

- Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA. May, 2009.
30. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/Bisphenol_A_skeletal.png
 31. 社團法人台灣環境教育協會。2017年。彩色圖解環境荷爾蒙，認識偷走健康，破壞生態的元兇。幸福綠光股份有限公司/新自然主義，2017年10月發行。
 32. <http://www.brederoshaw.com/solutions/oilsands/fbe.html>
 33. <http://www.pck.com.cn/en/products/products.aspx?productID=6>
 34. M. Zamanzadeh. (2016). Fusion Bonded Epoxy Coating (FBE) and Disbondment. NACE International Corrosion 2016 Conference & EXPO.
 35. Angela Colleen Newman. (2014). Anticorrosive Zn Free Pigments: Their Performance. PNWSCT, 2014.
 36. 杨海、陆卫中、李京、孙超，环氧粉末涂层在1.5 mol/L NaCl溶液中的失效行为。中国腐蚀与防护学报，第34卷、第4期，2014年8月。
 37. Richard Norsworthy. Fusion Bonded Epoxy- Afield Proven Fail Safe Coating System. NACE International Corrosion 2016 Conference & EXPO.
 38. <http://www.polyguardproducts.com/pipeline/non-shielding-coatings/>
 39. https://www.dnvgl.com/Images/Coating-Figure-1-test_tcm8-105087_w720.jpg
 40. 白晓慧、孟明群、舒诗湖、姚黎光(2017)，城镇供水管网数字水质研究与应用。上海科学技术出版社，2017年1月。
 41. <http://www.waterworld.com/articles/print/volume-30/issue-11/features/scale-factors-reducing-corrosion-in-pipelines-with-electronic-water-treatment.html>
 42. <http://parkrealtyatlanta.com/is-your-100-year-old-home-ready-for-a-buyers-inspection/>
 43. 胡洪营、黄晶晶、孙艳、吴乾元(2015)，水质研究方法。科学出版社，北京，2015年3月。

44. <https://www.lenntech.com/calculators/langelier/index/langelier.htm>
45. <http://www.plurisusa.com/resources/pluris-news/2016/wedgefield-water-softener-052016>
46. Palazzo. (2015). The accuracy of calcium-carbonate-based saturation indices in predicting the corrosivity of hot brackish water towards mild steel. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. vol.115 n.12 Johannesburg December, 2015.
47. Kenrick Berend, Tome Trouwborst. (1999). Cement-mortar pipes as a source of aluminum. *Journal AWWA*. Volume 91, issue 7. July, 1999.
48. Kuan-Ju Chiang, Chin-Ling Huang. (2014). The Impact of DIP Cement Mortar Lining on Drinking Water Quality. Young Water Professional Conference, Taipei. December, 2014.
49. <http://anticorrosiontechnology.com/index.php?id=113>
50. http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesion_tests
51. <https://www.pcimag.com/articles/100920-examining-interfacial-adhesion-of-biomedical-coatings>
52. <https://www.admet.com/testing-applications/testing-standards/astm-d1876-adhesive-peel-strength-testing/>
53. <https://www.tomahawksystem.ca/tomahawk>
54. <http://www.elcometer.com/en/index.html>
55. David Beamish. (2015). Pull-Off Adhesion Testing. Webinar. <http://slideplayer.com/slide/5667223/>. DeFelsko Corporation.
56. Det Norske Veritas. (2010). Final Report Dissecting Coating Disbondments. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. U.S. Department of Transportation. Nov. 2010.
57. Amal Al-Borno, Xianyi Chen, and Shailesh Kewaldas Dhoke. (2015). Effect of High Temperature Sodium Hydroxide Immersion on Fusion Bond Epoxy Coating. *International Journal of Corrosion*. September, 2015.

58. 何雙華、柳春光，地下管線的抗震可靠性研究。北京，中國水利水電出版社，2014年。
59. https://media.springernature.com/lw785/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-94-017-9460-2_1/MediaObjects/215632_1_En_1_Fig1_HTML.gif
60. <https://www.nap.edu/read/14189/chapter/5#32>
61. <https://ascelibrary.org/cms/attachment/728e5a82-57c8-43fe-b19c-73c99a03ab17/figure3.jpg>
62. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Site_effects_mexico_1985_recordings_v2.gif
63. <http://www.mdpi.com/2076-3263/8/5/170/htm>
64. <https://www.sein21.jp/NewSeinWeb/TechnicalContents/Motosaka/Motosaka0102.aspx>
65. 厚生労働省，「東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書」について(平成25年3月，2013年)。
66. 厚生労働省「平成28年(2016年)熊本地震水道施設被害等現地調査団報告書」について。
67. Kawakita. K., “Tokyo’s modern water system celebrates its centennial”. (1998). American Water Works Association. Volume 90, Issue 11.
68. Ballantyne, D., “Overview of Piping Systems and their Seismic Vulnerability” PE, Ballantyne Consulting LLC, Tacoma, Washington.
69. <http://www.jwrc-net.or.jp/index.html>
70. Buehrer. J., “Hey Napa- Your Afterslip is Showing”. (2015). Journal AWWA Sep.107:9. American Water Works Association.
71. <https://www.unavco.org/science/snapshots/solid-earth/2016/delong.html>
72. Oomori. E., Effort of Reinforcing Earthquake-Resistant Joint of Water Distribution Pipes in Tokyo Waterworks. 7th IWA-ASPIRE Conference 2017

73. 熊木芳宏、宮島昌克，延性鑄鐵管接頭型式損壞之相關調查。(2012)土木學會論文集A1(構造、地震工學), Vol. 68, NO. 4(地震工學論文集第31-b卷)
74. <http://www.jwrc-net.or.jp/index.html>
75. <http://www.dipra.org>
76. Oda. K., Ishihara. T., Miyajima. M., “Research of Earthquake Resistant Ductile Iron Pipe (ERDIP) for fault crossing”. Kubota corporation & Kanazawa University.
77. Deterioration of water quality - the effects arising from the use of factory applied cement mortar linings.
78. Drinking Water Distribution Systems- Assessing and Reducing Risks
79. JCPA T 47延性鑄鐵管內襯-環氧樹脂粉體塗裝
80. ASTM D 4541 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers
81. NSF/ANSI Standard 61, 2016.
82. 張美惠，硬質PVC管及PVC軟管揮發性及半揮發性有機化合物釋出研究，中華民國自來水協會自來水會刊106年8月第36卷第3期。
83. Bisphenol A in relining of water pipes, International Chemical Secretariat.
84. Drinking water contaminants from epoxy resin-coated pipes: A field study, Water Research 103(2016) .
85. CNS 13273 G3254 延性鑄鐵管及管件內面用環氧樹脂粉體塗裝。
86. ASTM D 4541 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers
87. EXPERIMENTAL RESEARCH ON DETERIORATION OF DRINKING WATER QUALITY AFTER CEMENT MORTAR PIPE LINING
88. Investigation of the effect of Water Quality, Lime and Calcite Dosing on Pipelines
89. Water quality deterioration from corrosion of cement - mortar linings.

90. 山水綜合技術顧問股份有限公司，自來水穿越既有排水箱涵規劃設計，
2017年
91. 黃欽稜，水理分析介紹與應用，2015年
92. 中華民國地下管道技術協會，自來水管線採用短管推進工法之探討，
2009年
93. 陳維政、謝百凱、林尚祺，自來水幹線克服排水箱涵障礙之對策探討，
2006年
94. 鄭國華、黃騰宏、王銘水、陳世雄、黃裕泰，高密度聚乙烯(HDPE)管
於礮區自來水供水之研究，2008年
95. 財團法人中華自來水服務社，球狀石墨鑄鐵管摩擦阻力測試 水工模型
試驗測試報告書，2018年

107年度專題研究計畫「自來水配水管材選用策略之研究」期中報告

審查會委員審查意見及辦理情形回覆

委員審查意見		辦理情形
范煥英委員		
1	本案研究內容主要針對鑄鐵管材，建議調整研究題目。	感謝委員建議，研究題目已更改為「自來水配水管材選用策略之研究—以北水處供水管網為例」(封面修正)
2	本研究目的在建立配水管管材選用策略，並以水質、防蝕、耐震、施工四項需求評估，建議就需求條件之不同，研究產出具判斷式之流程圖或篩選表表示之，說明其取捨原則。	謝謝委員建議，已於期末報告第六章「結論與建議」中補充(第六章6.1配水管選用策略)
3	財務分析為選用策略之要項，建議納入。	謝謝委員建議，已於期末報告第五章「DIP管材優化之推動」中補充(第五章5.4.2 NS管在地化生產)
4	搭配NS直管，建議於彎管使用防脫機制，亦可納入目前國內已有生產之K-bar接頭配件。	感謝委員的建議。 北水處現階段NS型耐震管國內生產的策略為NS直管在地製造、彎管採用國內既有防脫接頭取代NS彎管，可達成同樣的耐震效果，又能降低彎管製造成本，提升國內廠商生產意願。
楊碧變委員		
1	文獻回顧中也請稍加敘述臺北管材的演進歷史。	感謝委員提醒，已於研究緣起概述。
2	簡報中的新數據，請一併列入期末報告，並於結論中簡要陳述重點。	感謝委員建議，期末報告已如數列入，並於每一章增加小結。
3	報告書的前言所提到SSP給水管，國內製造商有幾家？使用的狀況以及價格如何降低的運用策略為何？亦請於期末報告補充。	感謝委員建議，SSP的製造商、北水處使用情況與價格降低的策略，已於第四章「配水管施工之管材需求探討」陳述之。
	延性鑄鐵管(DIP)之管內壁，無論採用水泥或粉體塗裝或其他方式防蝕，當延性鑄鐵管使用於配	謝謝委員提醒： 關於委員所提鑽孔處之防蝕方法，在北水處採用防銹銅套，可避免鑄鐵生

4	水管時，有被鑽孔加分水鞍以分設用戶管之機會，在鑽孔處之管內壁其防蝕保護層會有不同程度的剝落，這些剝落點讓延性鑄鐵管直接接觸含有餘氯的水體，容易腐蝕，經過一段時間變成脆弱點，這現象短期是否為漏水點？長期是否降低延性鑄鐵管使用壽命？研究發現國外是否有對應措施能提供給國內自來水事業參辦？	銹阻塞分水孔。至於避免粉體塗裝剝落，日本採用銳角鑽頭，可整齊切削鑄鐵及粉體，不會剝落，鑽孔後再打入防銹銅套防止新鮮鑄鐵面與水接觸，即可避免銹蝕。
5	報告書第121頁粉體塗裝管件則經常有內襯剝落的問題，導致粉體碎塊四散、阻塞水表等問題，本研究將透過大量試驗數據分析，建議將其納入建議與結論，供國內外自來水事業制定規範參考。	感謝委員提醒： 北水處已制定相關粉體塗裝拉拔強度之試驗步驟、允收強度，已於第五章「DIP管材優化之推動」中補充(第五章5.1.4粉體內襯規範修訂與鑄鐵廠商交流會議)
6	報告書第121頁地下管線因為土壤束制，震波全部轉換成軸向拉壓變形，而北水處的盆地軟弱土層更會放大軸向脫接趨勢，及最近國內地震頻傳。請問是否有類似產品，如何鼓勵國內廠商在地生產、增進國內生產技術，請於期末報告詳述。	謝謝委員提醒： 北水處已引進日本NS耐震接頭技術並進行試辦，台水公司六區、九區等也有意試辦，由於目前NS材料係進口，價格約四倍以上，不利後續推廣。北水處將擬定後續NS管材推動政策，提高國內廠商生產意願，以利降低產品價格，已於期末報告第五章「DIP管材優化之推動」中補充(第五章5.4.2 NS管在地化生產)。
7	DIP水泥內襯透過EPANET進行擴散分析得到豐富的結果，請擇要於期末報告結論中陳述。	謝謝委員建議，已於期末報告第三章小結擇要陳述。(第三章3.4小結1)
歐秋聲委員		
1	本研究對DIP的演進、製造及耐震接頭、管內襯水泥及粉體塗裝等過程說明甚詳，尤其將DIP水泥內襯在三重區某個供水區塊做吐鹼研究，針對此供水區塊將DIP新管160公尺埋設於進水端、末端、中間等三個地方做溶出分析，其成果豐碩，即建議於管線末端、流量小的管段、或高地系統應改採非水泥砂漿內襯	感謝委員的肯定。

	的粉體塗裝，將是一勞永逸的作法，值得自來水事業將來辦理管線汰換的重要參考。	
2	P.152圖3-23旋轉噴塗法，請修正為靜電塗裝方法。	謝謝委員提醒，將於期末報告修正
3	利用DIP內部粉體塗裝直管施工，因需裝置管件無法整支管理設，必須切斷適當管長施工，其切割管面的粉體塗裝可能遭破壞，應如何處理？又配水管須裝置分水鞍及接合管需鑽孔，直管內部的粉體塗裝勢將破損亦應如何處理？以防止通水後流速大造成粉體塗裝脫落之情事，請貴處惠予期末報告說明。	謝謝委員建議： 粉體塗裝相關的施工、倉儲等注意事項，已於期末報告第五章陳述，包含切管處的補修液使用、鑽孔選用適當鑽頭...等等，也會陳述DIP管倉儲堆置、管件運送吊裝之規定。(第五章5.3施工過程管材操作)
4	有關DIP內部粉體塗裝及NS型耐震接頭DIP直管等價格，請在期末報告惠予概估以利使用單位參考。	謝謝委員建議，DIP粉體直管價格目前並無確切價格可供參考。至於NS型材料價格，將於第五章「DIP管材優化之推動」中補充。(第五章5.4.2 NS管在地化生產)
5	依貴處所述，日本及美國等地區均使用NS型耐震接頭，能降低地震發生時因管線損壞而停止供水的風險，臺灣係地震頻繁地區，貴處是否可建立符合臺灣地區使用之耐震接頭相關規範，以利管材製造商及使用單位作為製造及採購的依據並廣為使用。	謝謝委員建議： 北水處引進NS包含整套相關材料、施工規範，已於第四章補充，另外關於NS施作地點，北水處將另案委託國震中心產製臺北盆地Risk Map，由風險高的區域列為選用NS的優先地區，由於時程因素，尚無法列入期末報告。
陳曼莉委員		
1	在進行模式擴散分析時，以TDS濃度為指標，為北水處TDS之背景濃度僅約55ppm，相較於水質標準500ppm極低，數據之分析解讀，建議不單就合乎水質標準與否來說明。	謝謝委員提醒： 內襯TDS的溶出與背景值有關係，北水處的自來水TDS較低、侵蝕性高，所以溶出反應較顯著，因此更顯採用粉體內襯直管的重要性，已於期末報告補充說明。(第三章3.4小結1)
2	內襯溶出vs水質，兩者有相互複雜相關性，如何取得平衡並對未來之操作策略提出建議。	謝謝委員建議： 北水處未來擬於高地用水量較少或較大範圍管網末端區域，先使用粉體內襯直管，以避免滯流水導致內襯溶出至飽和，而於管網中流量較大的管段及區域，因為流動稀釋，濃度不會升

		高，則仍可使用水泥內襯。 在粉體直管市場規模達到之前，的確有不同地區選用不同內襯的操作策略，例如高地區或流量小的管末端使用粉體直管、流量較大的配水管仍可使用水泥內襯直管，如果未來國內大量生產，達到市場規模，價格下降後，則可考慮參照日本NS管，採全粉體內襯。
3	健康風險評估，除報告中所列雙酚A外，建議再增加其他項目之說明。	謝謝委員建議： 建議仍可針環氧樹脂之其他組成，如表氯醇、硬化劑及添加物等成份進行水質檢驗。亦可再針對雙酚A之衍生物進行水質檢驗。(第三章3.2.5其他環氧樹脂可能溶出物探討)
4	相關水質檢驗報告中，若提及”ND”，建議應進一步說明偵測極限之數值。	謝謝委員建議： 本次檢驗雙酚A之ND偵測極限之數值為0.92µg/L
陳瑞忠委員		
1	關於粉體直管內襯施工切管、鑽孔的現場作業，研究團隊可參考台水公司四區處於南投400mm粉體管的作業實績。	謝謝委員建議： 107.10.11於台水舉辦的鑄鐵管、塗料廠商座談會，雙水彼此交換相關管材施作經驗，並向台水公司請益其粉體管作業實績，並列入期末報告第五章。
2	粉體直管內襯新舊狀況的粗糙度係數，可參考成大水工試驗所最近的研究報告。	謝謝委員建議： 已接洽成大水工試驗所，參考DIP粉體及水泥內襯粗糙度的研究成果。 (第二章2.6小結2)
3	本研究不僅對管材材質特性、力學行為研究十分深入透徹，相關檢驗包括水質影響等等均十分詳實完整，值得肯定，報告極具參考價值。	感謝委員的鼓勵。
4	本研究報告蒐集國內外資料豐富，值得國內製造廠商和使用單位參考，尤其個人從製造廠商方面來說，一般只著重在生產技術管理面，如何達到規範標準，而對於整個供水事業單位所有的觀點和資料，從本研究報告學到很多，而且需要再努力再進步。	感謝委員的肯定。

	本研究報告指出DIP環氧樹脂粉體塗裝和耐震NS管材的優點，至於大量使用、須國內生產以降低成本，嘉惠百姓，則有賴兩大事業單位能形成策略，製造廠商才能再投入大量資金增加產量。	謝謝委員的指導，已參考委員的意見，納入期末報告。(第五章5.1.6，提到拉拔試驗與允收規範，雙水分享交流)
籃炳樟副主任委員		
1	研究資料蒐集十分豐富、顯示研究十分用心，予以肯定。	感謝委員的肯定。
2	研究報告摘要希望期末時有中、英文簡要敘述。	謝謝委員的提醒，已於期末報告補充。
3	有關自來水配水管材選用策略，除管內徑之襯裡材質不同研究外，對管材之另件(Fitting)是否異材質也會影響水管壽命？可否一併納入探討，即除水質影響外，也一併研究水管壽命。	謝謝委員的建議： 本研究主要關注配水管內襯、材質、接頭耐震性、施工應用...等方面。委員所提之異種金屬材質的銜接，包含另件、直管、分支管...彼此銜接之電位腐蝕現象，的確是很重要的課題，未來將另案進行研究。
4	中華自來水服務社最近委託成大水工試驗所作DIP cement lining與epoxy bound lining求其C值並比較差異，俟報告提出後將送兩個自來水事業參考，其結果可作為本報告所提避免口徑over designed之參考。	謝謝委員建議： 已接洽成大水工試驗所，參考DIP粉體及水泥內襯粗糙度的研究成果。(第二章2.6小結2)
張順莉委員		
1	本報告研究方法及流程應屬適當，與自來水管材相關文獻與蒐集分析完整，值得肯定。	感謝委員的肯定。
2	建議未來可強化自來水管材知識庫，完整累積紀錄專案歷程管材、使用環境及管理維護，並掌握材質、生產製造及工法演進趨勢，以利傳承延續提升管材選用策略。	謝謝委員的建議： 本研究報告將提供給北水及台水參考，以擴充KM知識庫的內容。
3	本研究自來水配水管材選用策略，建議可加強應用於同情境與條件差異之分析。	謝謝委員的建議： 同樣的配水管材，在不同環境下的確有不同的選用策略，例如高地區水量

		小的環境及平地大流量的區域，水泥內襯對水質的衝擊就差異很大，選用策略就不同，已於期末報告補充說明。
李公哲主任委員		
1	本案之題目建議改寫為「自來水配水管材選用策略之研究—以北水處供水管網為例」，以更切合研究內容。	感謝主任委員的建議： 已於期末報告時修正題目。
2	有關塗在水泥上的液態epoxy，有微量雙酚A溶出之健康風險，建議多儘量收集相關資料或其他相關項目，以釋外界可能之疑慮。	謝謝委員建議： 本研究建議仍可針環氧樹脂之其他組成，如表氯醇、硬化劑及添加物等成份進行水質檢驗。亦可再針對雙酚A之衍生物進行水質檢驗，檢驗方法可依國內CNS 15274溶出試驗方法或NSF61的試驗方法進行檢驗。 (第三章3.2.5其他環氧樹脂可能溶出物探討)

107年度專題研究計畫「自來水配水管材選用策略之研究-以北水處供水管網
為例」期末報告審查會委員審查意見及辦理情形回覆

委員審查意見		辦理情形
楊委員碧變		
1	本研究各章均有小結，讓讀者一目了然，本研究對於配水管材均有深入探討，對自來水事業單位或業者相當有助益，感謝團隊付出。	感謝委員的肯定。
2	建議將第五章小結，納入第六章結論與建議(因第六章結論與建議均從各章小結引述)。建議將第六章架構改為 6.1 結論、6.2 配水管材選用策略及 6.3 建議。	謝謝委員建議： 第五章小結內容將擇要放置於第六章結論與建議。
3	請問 DIP 粉體塗裝是否已制定相關規範，可否於內容摘述，並建議提供給台水參考。	謝謝委員建議： 本次研究案已制定粉體塗裝拉拔試驗規範，請委員參照研究報告第 249 至 250 頁。
4	建議是否可就研究四大構面，水質、防蝕、耐震及施工，各別引述研究結論與建議。	謝謝委員建議： 將配合調整第六章結論與建議內容。
歐委員秋聲		
1	本研究針對配水管 DIP 管內襯(水泥、粉體塗裝)對水質及防蝕影響，接頭的耐震型式、粉體塗裝的拉拔強度及鑽孔試驗都有深入探討及實證，報告內容相當完整且實用。配水管材選用策略對於自來水事業有實質的幫助。	感謝委員的肯定。
2	大型波狀管的可撓特性對管線遷移及管障有良好的施工性，同時可減少漏水修理時間與降低漏水潛勢，是優良的選用管材。請問埋設大波管的覆土深度及回填材料為何?才不致因重車碾壓造成管線破裂。	謝謝委員建議： 有關埋設深度不足部分，本處已委託結構技師計算，最少覆土深度 30 公分，並以鋼筋混凝土補強即可確保管線不會遭重車碾壓造成管線破裂。
3	本研究案於分析拉拔試驗驗收標準的方法，有平均強度法及最低門檻法，最終沒將最低門檻法納入允收標準的原因為何?	謝謝委員建議： 本研究案最初係將試驗數據依平均強度法及最低門檻法制定驗收標準，再經召開多場廠商座談會，考量最低門檻法於初期推動過於嚴苛，最終予以刪除。

陳委員瑞忠		
1	本研究報告針對配水管材在水質、防蝕、耐震及施工四大構面，有非常詳實完整的研究資料收集。	感謝委員的肯定。
2	本研究報告在相關自來水管線研究方面，無論是在臺灣、中國大陸甚至國外，是本人讀過最豐富、最充實、最完整且最有參考價值的好文章報告，亦是決策者很好參考資料。	感謝委員的肯定。
3	感謝北水處研究團隊和興南公司技術單位人員切磋討論，使得本報告更臻充實，對製造商而言可說是獲益良多，尤其是在問題的發現和改良的方法，是興南公司後續努力改進之處。	感謝委員的肯定： 感謝興南公司於研究案進行過程所給予之協助。
范委員煥英		
1	本研究案問題剖析完整，透過嚴謹之研究提出務實的改善對策，為不可多得的研究報告。	感謝委員的肯定。
2	為改善粉體塗裝品值問題，提出拉拔試驗規範，並採漸進方式提升規格要求，鼓勵廠商提升製造品質，再與台水共同推動試驗規範，整套推動策略明確可行，是此份報告最有價值之處。	感謝委員的肯定。
3	台水與北水處正在大力推動管線汰換，建議在第六章結論與建議提出 NS 管具體的推動期程表，鼓勵國內廠商加速開發。NS 管生產若能及早全面使用，在有限的資源下，將是很具效益的做法，同時將大幅增加管網耐震能力。	謝謝委員建議： NS 管理設計畫短期僅能仰賴日本進口，材料價格昂貴。當 NS 管在地化生產且價格大幅下降時，才有可能全面汰換為 NS 管。另 NS 在地化生產是否可透過政府機構補助實施，建議可由製造商撰寫研究計畫，委託水協會提送水利署研議。
陳委員曼莉		
1	第六章配水管材選用策略表，其中第一部分對風險情形之描述，建議應以客觀之角度來描述。另外採用 DIP 粉體塗裝是否為唯一選項，亦應再補述。	謝謝委員建議： 將於第六章配水管材選用策略補述。

2	建議水齡過長及LSI偏低問題之對策，可分別說明。	謝謝委員建議： 將於第六章配水管材選用策略補述。
籃炳樟副主任委員		
1	拉拔強度允收標準，管件 11 MPa，直管 16 MPa。建議管件之允收標準宜以落日條款限定，逐年提高允收標準，以敦促廠商提升製造品質，保障自來水用戶之飲用水品質。	謝謝委員建議： 初期標準管件 11 MPa，直管 16 MPa，後續驗收強度，則依每年採購新增試驗值分析，逐次檢討驗收強度。 目前僅訂初期粉體塗裝允收標準，後續要求更高粉體塗裝品質時，鑄鐵管製造商必定增加生產成本，屆時應適度提高管材單價