



延性鑄鐵管耐震能力評估及發展

文/吳世紀

一、前言

延性鑄鐵管具有高強度、高韌性、耐蝕性及施工性佳等優點，於 1955 年開發問世以來即廣為各業所應用，包括自來水事業之輸配水管線系統，日本於 1960 年代開始全面採用，由於延性鑄鐵管係屬於不連續之接頭構造管線系統，相較於管體本身之高強度及延展性，接頭雖然具可撓及伸縮性，能吸收一定之撓角及變位，但同時也是整體管線系統之相對弱點，因此，為因應多震之環境，日本一直致力於研發精進管材之接頭型式以提升整體管線系統之耐震能力，鑑於 1995 年神戶大地震對傳統柔性接頭(A 型、K 型及 U 型等)有明顯之破壞，日本已逐漸將管線系統接頭進化至新一代之扣鎖式接頭(S 型、NS 型、US 型等)，較傳統柔性接頭更能抵抗地震之破壞。我國地理條件環境與日本同屬環太平洋地震帶，不僅地理條件及位置接近，且自來水管線設施亦多依循日本之發展模式，故自來水用延性鑄鐵管材之規格包括國家標準 CNS 在內均延用日本 JIS 之標準，惟國內目前採用之管材型式仍以沿用近 30 年之第一代傳統 K 型接頭為主流，在強烈地震來襲之下能否確保管線功能正常尚難以得知，此外，該類管材所能承受之地震規模以及其與新一代耐震管材間之性能差距為何，亦有待進一步探討瞭解，作為設計之參考。

本文主要介紹國際上延性鑄鐵管耐震能力之發展演進，評估探討延性鑄鐵管耐震

能力，並以案例分析地震力作用下之耐震行為，與國內目前發展之耐震管材進行比較，以作為未來國內耐震管材發展之參考。

二、鑄鐵管耐震發展趨勢

鑄鐵管沿用已有數百年歷史，近代鑄鐵管為一般不具延展性之灰口鑄鐵材質，強度及韌性遠低於目前之延性鑄鐵材質，且早期接頭型式為灌鉛及麻料之白口接頭(圖 1)，接頭無法承受伸縮及撓曲，故在順應地震所造成之地盤變動能力上較為不足，屬於「剛性接頭」，後來隨橡膠技術之發展，利用橡膠優異之壓縮彈性及耐久性作為接頭之止水機制，成為能承受些微伸縮及撓曲之機械接頭(A 型接頭，圖 2)，逐漸取代白口接頭成為鑄鐵管接頭主流，而隨後開發問世的延性鑄鐵管更結合各類新型接頭讓整體管線系統更為可靠及耐用。在傳統機械接頭之基礎上，美國進一步發展出無螺栓壓圈、安裝簡便之插入式 T 型接頭(Tyton Joint，又稱 Push-On Joint，圖 3)，並大量採用，而後美國接頭型式發展亦多以此為基本型式演進，迄今歐美等國之延性鑄鐵管接頭主流型式為此種插入式 T 型接頭；反之，日本則是以螺栓壓圈固鎖之機械接頭型式加以改良，加深傳統機械接頭之承口並改良止水膠圈，增加傳統機械接頭撓曲及拉伸之變形能力，成為目前我國自來水延性鑄鐵管最常用之 K 型接頭(取日文「改良 Kai-ryou」羅馬發音字首，圖 4)，屬於「柔性接頭」。

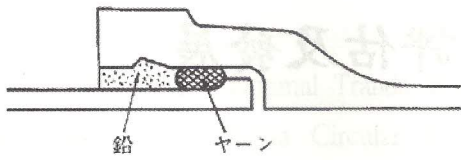


圖 1 灌鉛白口接頭

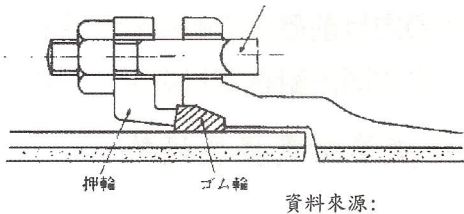


圖 2 機械接頭(A型)

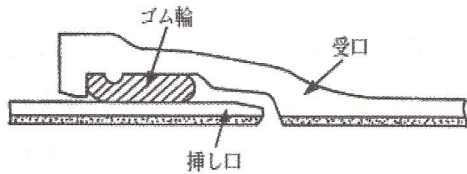
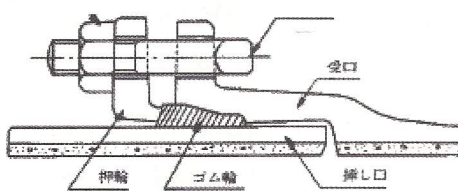


圖 3 機械接頭(T型)



以上資料來源：日本延性鑄鐵管協會技術資料

圖 4 機械接頭(K型)

然而囿於地震所造成管線設施之災損仍頻，日本進一步投入耐震管材(接頭)之發展，其國土開發技術研究中心於 1977 年訂定「地下埋設管路耐震接頭技術基準」，針對延性鑄鐵管接頭所能承受之拉脫力、撓角及伸縮量等變形能力，區分為伸縮型及屈曲型耐震接頭二類訂定標準等級，分別針對伸縮、撓曲及防脫性能區分不同等級(表 1、表

2)，以伸縮性能為例，接頭伸縮量在 $\pm 0.01L$ mm 以上者列為最高等級 S-1 類，舉例而言，延性鑄鐵管平均一支 6 公尺，其接頭伸長與縮短容許值必須分別達+6 及-6 公分才符合最高 S-1 等級，換言之，承插接頭總伸、縮量須達 12 公分。

表 1 伸縮型耐震接頭

項目	区分	継手の性能
伸縮性能	S-1 類	伸縮量 $\pm 0.01l$ mm 以上
	S-2 類	" $\pm 0.005l$ mm 以上
	S-3 類	" $\pm 0.01l$ mm 未滿
離脱防止性能	A 級	離脱防止抵抗力 0.3d tf 以上
	B 級	" 0.15d tf 以上
	C 級	" 0.075d tf 以上
	D 級	" 0.15d tf 未滿

表 2 屈曲型耐震接頭

項目	区分	継手の性能
屈曲性能	M-1 類	屈曲角度 $\pm 15^\circ$ 以上
	M-2 類	" $\pm 7.5^\circ$ 以上 $\pm 15^\circ$ 未滿
	M-3 類	" ± 7.50 未滿
離脱防止性能	A 級	離脱防止抵抗力 0.3d tf 以上
	B 級	" 0.15d tf 以上
	C 級	" 0.075d tf 以上
	D 級	" 0.15d tf 未滿

(注) d：管外径(mm)。一般には呼び径とする。

資料來源：日本延性鑄鐵管協會技術資料

基於一般 K 型接頭構造之先天限制無法達到上述標準，日本產業界於是針對如何達成此技術基準進行耐震接頭之研發，從原來之 K 型機械接頭改良增加接頭承口插入之有效深度以及內部卡榫機制，強化接頭拉伸及防脫性能，使其在伸縮性及防脫性方面能符合 S-1 類及 A 級之最高等級，發展出耐震 S 型接頭(Seismic，圖 5)，其後更進一步改

進施工性，參考插入式 T 型接頭之構造，簡化組裝構件及工序，成為施工性更佳之新型耐震 NS 型(New Seismic，圖 6)以及目前所謂「次世代」之 GX 型(Next Generation，圖 7)接頭，其接頭容許伸縮率及抗脫力之設計均以該國國土開發技術研究中心所訂之「地下埋設管路耐震接頭技術基準」為目標基準，分別達到基準指標 S-1 及 A 級之伸縮及抗拉脫最高等級，撓度則介於 M2~M3 之間，此類管路構造就如同鎖鍊般能伸、能屈、能彎又能抗拉脫，屬於耐震性能優異的「鎖構造接頭」。

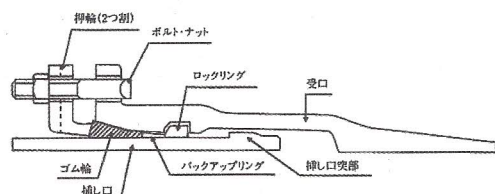


圖 5 S 型接頭構造

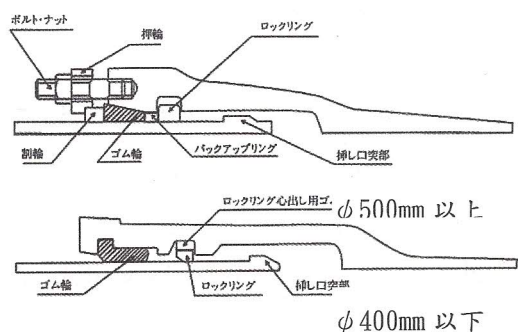


圖 6 NS 型接頭構造

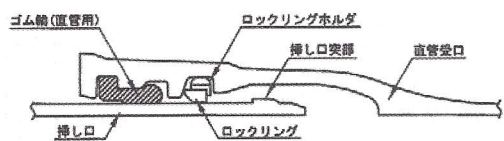


圖 7 GX 型接頭構造

以上資料來源：日本延性鑄鐵管協會技術資料

日本國土開發技術研究中心所訂之「地下埋設管路耐震接頭技術基準」亦逐漸成為

國際上衡量延性鑄鐵管耐震能力之指標，國際標準組織 ISO 於 2006 年直接引用該技術基準之分類，增訂 ISO16134「延性鑄鐵管耐震及沉陷設計 (Earthquake and subsidence resistant design of ductile iron pipelines)」，將延性鑄鐵管耐震能力依伸縮率、抗拉脫及可撓角等三類區分等級(表 3)，已成為目前國際上評量延性鑄鐵管耐震性能通用之評量標準。

表 3 ISO 16134 耐震接頭標準

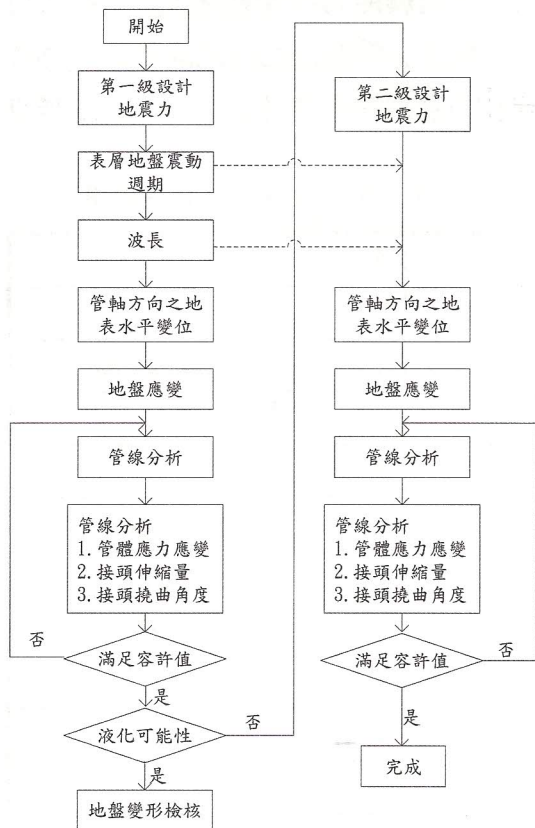
分類	等級	標準
伸縮率	S-1	$> \pm L * 1\%$
	S-2	$\pm L * (0.5\% \sim 1\%)$
	S-3	$< \pm L * 0.5\%$
抗脫力	A	$> 3D$ kN
	B	$1.5D \sim 3D$ kN
	C	$0.75D \sim 1.5D$ kN
	D	$< 0.75D$ kN
可撓角	M-1	$> \pm 15^\circ$
	M-2	$7.5^\circ \sim 15^\circ$
	M-3	$< 7.5^\circ$

L: 單支管長 D: 管徑

三、鑄鐵管耐震設計案例分析

依據日本水道協會出版之「水道設施耐震工法指針解說」中有關埋設管線之耐震分析係採用反應變位法，將地震分為二級，第一級地震(Level 1)所指為管線生命週期內常會遇到之一般性地震規模及震度，第二級地震(Level 2)為設備生命週期內偶爾遇到之大規模地震例如日本神戶大地震及台灣集集大地震等之規模，其分析方法首先是將第一級與第二級地震力輸入求得地盤震動週期及波長等，以及管線軸向之應力與應變，同

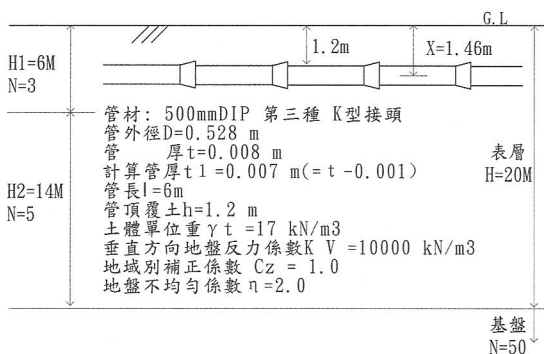
時考慮地震後土壤液化，計算得管線接頭在管軸方向所產生之管體應力、接頭伸縮量及撓角等，並與容許值作比較，以確認接頭是否具足夠之耐震能力。地下管線耐震設計分析流程如圖 8。



資料來源：水道設施耐震工法指針解說

圖 8 地下管線耐震分析流程

茲以案例計算說明如下：



1.管線斷面基本資料

斷面積

$$A = (\pi/4)[D^2 - (D-2t)^2] = 0.01226 \text{ m}^2$$

斷面慣性矩

$$I = (\pi/64)[D^4 - (D-2t)^4] = 0.00041541 \text{ m}^4$$

斷面係數

$$Z = 2I/D = 0.001574 \text{ m}^3$$

2.表層地盤震動週期及波長

地層	層厚 Hi(m)	N 值	平均剪力波速度 Vsi(m/s)	Hi/Vsi
1	6	3	61.8*N ^{0.211} =77.92	0.07700
2	14	5	61.8*N ^{0.211} =86.79	0.16131
基盤	-	50	205*N ^{0.125} =334	-

表層地盤平均剪力波

$$V_{DS} = \sum H_i / \sum (H_i/V_{si}) = 83.92 \text{ m/s}$$

表層地盤震動週期

$$T_G = 4 * \sum (H_i/V_{si}) = 0.95 \text{ s}$$

$$\text{波長 } L = 2L_1 * L_2 / (L_1 + L_2) = 127.4 \text{ m}$$

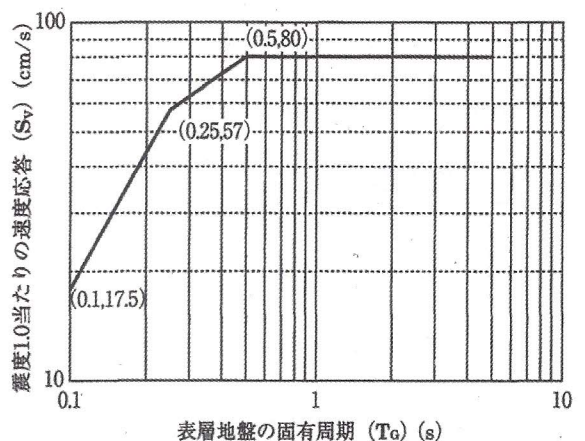
(註: $L_1 = V_{DS} * T_G = 79.7 \text{ m}$; $L_2 = V_{BS} * T_G = 317.3 \text{ m}$)

$$\text{修正波長 } L' = \sqrt{2} * L = 180.2 \text{ m}$$

3.第一級地震力檢討

第一級地震速度反應譜 $T_G = 0.95 \text{ s}$ 相對應之

速度 $S_v = 0.8 \text{ m/s}$



資料來源：水道設施耐震工法指針解說

管軸方向之地表水平變位振幅及應變

$$U_{h1(x)} = (2/\pi^2) * S_v * T_G * K_{h1} * \cos(\pi x/2H)$$

$$= 0.0229 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{G1} = \eta (\pi * U_{h1})/L = 0.00113 = 0.113\%$$

(η :地盤不均一係數, 假設極度不均, $\eta = 2$)

接頭伸長量

$$e_1 = \varepsilon_{G1} * l = 0.113\% * 6\text{m} = 6.78\text{mm} < \text{容許伸長量}$$

(33mm) OK

接頭撓角

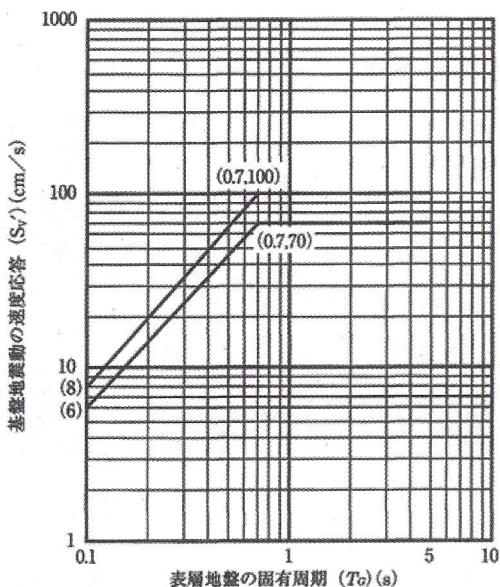
$$\theta_1 = 4\pi^2 * \ell * U_{h1} / L^2 = 0.0006684 \text{ rad}$$

$$= 0^\circ 2' 18'' < \text{容許撓角}(3^\circ 20') \text{ OK}$$

(4)第二級地震力檢討

第二級地震速度反應譜 $T_G = 0.95 \text{ s}$ 相對應之

速度 $S_v' = 1.0 \text{ m/s}$



資料來源:水道設施耐震工法指針解說

管軸方向之地表水平變位震幅及應變

$$U_{h2(x)} = (2/\pi^2) * S_v' * T_G * \cos(\pi x/2H)$$

$$= 0.1912 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{G2} = \eta (\pi * U_{h2})/L = 0.00943 = 0.943\%$$

接頭伸縮量

$$e_2 = \varepsilon_{G2} * \ell = 0.943\% * 6\text{m} = 56.58\text{mm} > \text{容許伸長量}$$

(33mm) NG

接頭撓角

$$\theta_2 = 4\pi^2 * \ell * U_{h2} / L^2 = 0.0055807 \text{ rad}$$

$$= 0^\circ 19' 11'' < \text{容許撓角}(3^\circ 20') \text{ OK}$$

根據以上計算案例顯示,無論在第一級或第二級地震力作用下所造成之接頭撓角均遠小於容許值,至於在伸長量部分,在一般性地震力(第一級)作用下所產生之變形仍為有限,然而第二級地震所產生之接頭伸長量則大幅增加到 56.58mm,已接近 K 型接頭最大極限伸長量(64mm),依據日本所訂之延性鑄鐵管接頭容許變位係將接頭極限拉伸長度折減約一半,亦即考慮安全係數為 2,故 $\phi 500\text{mm}$ DIP K 型接頭之容許伸長量僅為 33mm,已無法承受大規模(第二級)地震所造成之接頭伸長變位,將造成脫接損害。因此,控制接頭損害之主要關鍵在於拉伸量,而其重點又在於安全係數之取決,在不考慮安全係數之條件下, K 型接頭仍勉強滿足大規模地震所引發之接頭變動,倘若加上安全係數之考量,以及土壤液化所導致之承載力喪失等因素,則須以容許變形量更大之耐震型接頭(如 S 或 NS 型等)方能提供足夠之變形及抗脫能力,抵抗震害。我國管線耐震性能是否需要如日本般採高規格條件,將接頭安全係數提高至 2 以上之標準,除必須評估整體埋管地盤條件如液化潛能及管線系統之重要性外,同時必須考量耐震管材之成本效益及採購限制,還有國內是否有其他替代性方案可供作選擇。

四、我國耐震管發展及未來展望

我國延性鑄鐵管長期以來均依循日本規格,接頭型式從早期一般機械 A 型接頭發展到 K 型接頭,然日本隨著地震所造成之損

害積極研發耐震型接頭，包括 S 型、NS 型及更新一代之 GX 型，早期北水處亦曾採購 S 型管材試用，其價格約為國內一般 K 型接頭之 3~4 倍，此種管材之專利權獨佔性導致成本高昂以及採購限制競爭之問題，造成國內難以推廣採用；此外，受限於國內侷限之市場規模，我國自來水管材鑄造廠商長期以來並未投入太多資源致力於研發，造成 K 型接頭一用數十年，相較於日本之發展，國內廠商產業技術及管線耐震功能均呈停滯不前。

近年來國內針對延性鑄鐵管材之耐震化一直處於研究性質，只聞樓梯響卻未見實質研發、量產以及應用，所幸興南鑄造廠股份有限公司(以下簡稱興南公司)投入管材接頭耐震化之實質研發，以 T 型及 K 型接頭為原型，分別研發出 T-bar 與 K-bar 防脫耐震型接頭，並經國家地震中心試驗證實其抗拉脫性能(圖 9)，其中 K-bar 接頭管材並經臺北自來水事業處工程總隊設計試辦採用，實際應用於軟弱地盤且具高度液化潛能之土層-三重二重疏洪道重劃區自來水配水管新設工程，並辦理工程技術觀摩(圖 10、11)，國內自製延性鑄鐵管接頭耐震化總算踏出重要的第一步。

以下簡介興南公司所發展之 K-bar 耐震接頭：顧名思義，K-bar 係以 K 型接頭為原型加以改良之接頭(如圖 12)，而其改良之重點在於加強接頭之防脫能力，且不影響其原有之容許拉伸及撓角。依據前章案例鑄鐵管耐震計算分析得知，在第一級地震作用下之接頭並無太大拉伸及變形，然而第二級地震力作用下，則接頭將產生較大之拉伸量，且



圖 9 國家地震中心測試 K-bar

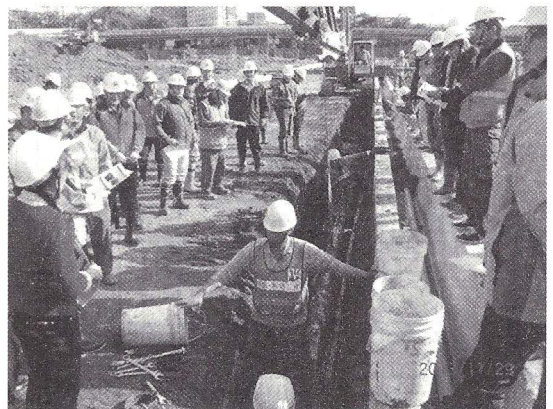


圖 10 耐震管材工程技術觀摩

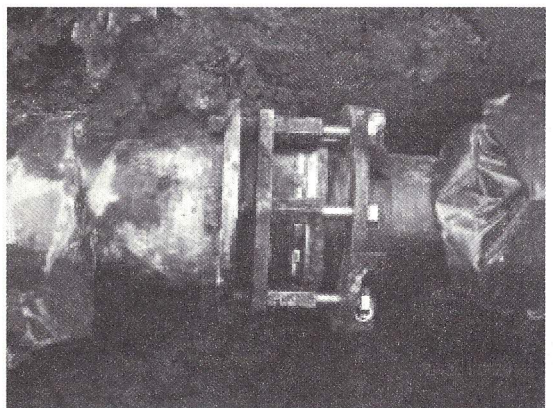


圖 11 技術觀摩 K-bar 現場組裝

已接近於接頭極限伸長量，可能導致脫接，因此，K-Bar 之作用機制主要係在 K 型接頭遭拉脫至其容許拉伸量之後即透過接頭防止構造阻止其繼續拉伸，且須具有一定之抗拉脫力，以避免較大規模地震所導致之接頭脫接。在構造上，管材製造出廠前於管尾處加銲一道同為延性鑄鐵材質之擋環，於工地組裝時利用接合螺帽將 T 型螺栓與不銹鋼螺栓串連，使該擋環與承口串連，當接頭拉脫超過容許拉伸量 X 時，擋環及螺栓開始發揮作用避免接頭繼續拉開，抵抗承插口間可能過大之拉脫位移，同時仍保有該型接頭之容許位移及撓角，依據 ISO16134 標準之耐震分級，其抗脫力部份從原來不具拉脫力之 D 級提升至 B 級水準。美國延性鑄鐵管廠商也有生產構造類似之接頭型式產品(圖 13)，屬於 A 型接頭改良之固定之防脫接頭，容許伸縮及撓角甚小，其設計原意在於考量利用防脫性能取代固定台之施作，同時兼具提升耐震性能之作用。

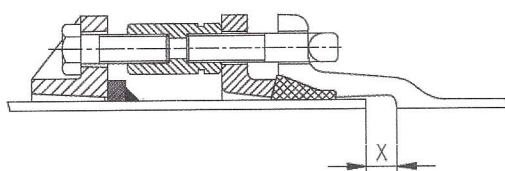
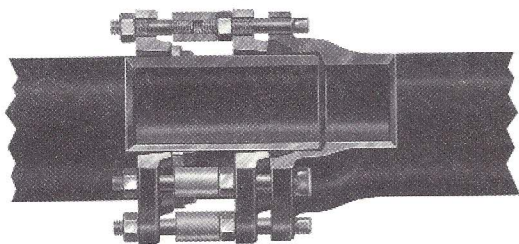


圖 12 K-bar 接頭斷面構造圖



資料來源: American Pipe Website

圖 13 美國防脫接頭型式

依據 ISO16134 之分類標準，K-bar 雖大幅提升 K 型接頭之抗脫性能，在整體耐震性能上仍不及 S 或 NS 型接頭(詳表 4)，然在管材費用方面，相較於日本 NS 型耐震管材價格為國內常用一般 K 型接頭管之 3~4 倍，K-bar 防脫管材價格僅約為其 1.5 倍，經濟性佳；至於施工性方面，K-bar 與 S、NS 型管均存在相同之問題，即組裝工序繁瑣，施工工率低，直接工程費用增加，故整體工程連工帶料約為一般管材工料費之 2 倍；此外，其抗拉脫之卡榫機制主要是靠固定於管尾之銲接擋環，然而，當須配合現場空間進行裁切時，須於管尾補銲一道擋環，擋環於工地之銲接品質除須有合格銲工外，同時須自備鑄鐵專用特殊銲條進行現場銲接，除將大幅耗費施工時間外，工地現場之銲接品質控管更屬不易，以上施工性之精進改善將成為後續此類耐震管材進一步推廣適用必須克服之課題。

表 4 管材性能比較

接頭	S、NS 型	K-bar 型	K 型
性能			
伸縮性	S-1	S-3	S-3
抗脫性	A 級	B 級	D 級
可撓性	M2~M3	M3	M3
經濟性	3~4 倍	1.5 倍	1 倍

註：依 ISO16134 標準分類等級

五、結論

延性鑄鐵管之承插式柔性接頭具有可撓及拉伸變形能力是其優點同時也是缺點，接頭雖具有相當程度之耐震性能，惟在劇烈地震來襲下可能導致接頭拉脫損害，此

外，地震所引發之土壤液化問題亦將造成管線系統失去支撐而脫接，此類問題在歷次主要大地震均有實際案例印證，因此，長期以來延性鑄鐵管之耐震性功能改良之方向都是在不影響其變位能力之前提下，進一步強化其防脫抗拉能力，然而接頭防脫力之強化會使接頭施工更加繁鎖及費時，除管材費用之直接成本增加外還有施工工率降低等間接成本，故如何提高施工可行性為研發耐震管材過程極為重要之考量因素，儘量減少施工之不便與阻礙，才能獲得進一步擴大推廣使用。最後，國內管材製造商在極其有限之市場規模及資源條件下，仍願意務實針對問題進行研發適合本土環境之耐震管材，政府機關單位應該予以大力支持及鼓勵，以誘使其他更多廠商投入研發，促成整體產業技術之發展與進步，最重要者是當重大天災發生時，我們賴以維生之管線仍能屹立不搖，發揮最佳抗震效能。

參考文獻

- 1.日本水道協會，2009年，水道設施耐震工法指針·解說
- 2.日本延性鑄鐵管協會，2002年，地震と管路について
- 3.國土開發技術研究センター，1977年，地下埋設管路耐震接頭技術基準
- 4.ISO16134，2006年，Earthquake and subsidence resistant design of ductile iron pipelines
- 5.興南鑄造廠股份有限公司網站
(<http://www.snpipe.com>)
- 6.American Cast Iron Pipe Company Website
(<http://www.american-usa.com>)

作者簡介

吳世紀先生

現職：臺北自來水事業處工程總隊股長

專長：自來水管線工程規劃、設計及施工管理