

# 第一章 緒論

本文探討應用滑動式摩擦單擺隔震支承於非剛性儲存槽之可行性。由於摩擦單擺支承隔震結構之周期僅與支承滑動介面之曲率半徑有關，因此無論儲存量多寡其結構動力特性均保持不變且能完全掌握，較橡膠式隔震系統更適用於儲存槽之隔震。本研究首先根據一足以忠實反應儲存槽動力特性之簡化模式建立非剛性儲存槽隔震系統之結構—流體動力方程式，進而利用剪力平衡法解析非線性動力系統之動態反應。數值模擬分析係藉由不同之地震震波與強度，以了解非剛性儲存槽以摩擦單擺支承隔震前與隔震後動力特性之差異。分析結果顯示，槽壁的振動與液面激盪位移之互制效應極微，故儲存槽隔震後流體液面激盪位移可由隔震之剛性儲存槽估算；非剛性儲存槽以摩擦單擺支承隔震後，儲存槽之受震反應無論是基底剪力或傾覆力矩均有顯著折減，證實其應用於工業儲存槽之防震甚為可行。

## 1.1 研究目的

石化工業對於我國經濟的成長與繁榮扮演舉足輕重的角色。石化工業對於其原料或產品，無論是氣體或油料，均須依其特性以適當型式的儲存槽加以存放，並利用管線作為輸送之管道。由於台灣位處地震帶，石化儲存槽與管線的耐震能力與安全檢核便極為重要，一旦儲存槽或地下管線發生倒塌及

破裂，不僅會造成生產系統的癱瘓，若所儲存或輸送之有毒易燃物外洩，將立即造成嚴重的環境污染，並可能發生火災爆炸等公安事件，進而危及人員生命財產的安全，將付出極大的社會成本。九二一地震後，結構耐震設計規範已將地震力係數提高，新建之工業儲存槽應如何設計以滿足規範之要求有必要進行研究。而既存、老舊之儲存槽其耐震設計標準較為寬鬆且逐漸老化，公共安全實隱藏潛在危機，有關工業儲存槽之耐震設計及補強新技術之研發工作刻不容緩。

儲存槽破壞的機制主要可分為：一、過大之軸壓力與彎矩造成槽殼挫屈，如圖 1.1；二、液體動態激盪壓力造成槽頂破壞，如圖 1.2；三、基礎不均勻沉陷造成之破壞…等。其中，槽殼挫屈主要是地震時過大的傾覆力矩造成槽殼受到軸壓力所導致，例如 1964 年日本 Niigata 地震、Sendai 地震及美國 Alaska 地震中，油槽均受到嚴重的損壞，並造成火災與環境污染的後果。有鑑於此，本研究擬針對儲存槽之耐震行為進行深入研究，並發展有效的防震技術。

將隔震技術應用於結構防震至今已有二十多年的歷史，它不但可以應用於新建結構，亦能應用於老舊房屋、橋樑之耐震補強。目前國內、外有關隔震的研究多係針對房屋及橋樑結構，大型儲存槽的應用仍不多見。儲存槽有別於一般土木結構，其重量常隨儲存量多寡而變化，某些儲存槽則存放極低溫的物質，例如液態瓦斯儲存槽，若以橡膠類隔震支承進行隔震，橡膠於低

溫下有脆化之虞，因此並不適用。由於摩擦單擺支承隔震結構其周期僅與滑動界面之曲率半徑有關，因此無論儲存量多寡其結構動力特性均能完全掌握，且其不銹鋼材質在低溫下不會如橡膠般產生脆化，因此應用在儲存槽隔震較為可行。目前 FPS 已有應用的實例—如美國 ISP 公司之 Ammonia 儲存槽、美國 Dow Chemical 公司之緊急備水槽及希臘公共瓦斯公司之大型液態天然瓦斯儲存槽【1】。惟在應用這項隔震技術前，仍須進行相關之研究及實驗，俾便更充分掌握其結構特性，建立隔震儲存槽之設計、分析與評估能力，將有助於研擬設計準則及設計程序。

## 1.2 文獻回顧



儲存槽流體動力理論之發展已有四十多年的歷史，最早可追溯至 1957 年，Housner 首先提出矩形及圓形儲存槽在地震作用下的動力反應分析【2】。他假設槽體為非剛性，並錨定在堅硬之基礎上，因此可將儲存槽模擬為一單自由度系統；動水壓則分成衝擊壓(impulsive pressure)及對流壓(convective pressure)兩個部分—衝擊壓是液體隨槽殼之加速度運動所造成，對流壓則是液體在槽殼內因激盪所形成。此後，陸續有許多研究提出分析與設計儲存槽的方法。Haroun 及 Housner【3-5】針對圓形儲存槽，考慮流體具不可壓縮(incompressible)、非旋性(irrotational)及非黏性(invicid)等性質，由拉普拉斯方程式(Laplace equation)建立流體動力方程式；在槽殼分析上則採用彈性薄壁

理論並建立有限元素分析模式，同時分別探討由靜水壓力所導致之初始環狀應力影響、液體表面激盪與槽殼振動之關係、土壤柔性及儲槽頂蓋非剛性之影響。其研究結果指出，液體表面激盪與槽殼振動間之交互影響極微，並建議有關衝擊（Impulsive）壓力之計算可忽略液體表面激盪運動，至於對流（Convective）壓力則可根據剛性儲存槽之流體動力分析模式計算；此外，其研究亦發現，儲存槽之  $\cos(n\theta)$  自然振動模態主要係由於儲存槽製作之誤差所致，而儲槽的動力特性係以  $\cos\theta$  之自然振動模態最為重要。Haroun 及 Ellaithy【6】進一步考慮非剛性儲存槽基礎板之水平及轉動自由度，並分別求得等效基底剪力與傾覆力矩以評估其動力行為。接續 Haroun 及 Ellaithy 等人之研究，Haroun 及 Wajdi【7】探討儲存槽承受水平地震力時之土壤-儲存槽互制效應，其結論顯示，儲存槽反應因為考慮互制行為而放大，其放大參數則由土壤剪力波速與儲槽幾何性質控制—例如鬆軟土壤及細長儲槽動力放大效應較為顯著。非剛性儲存槽之地震反應有別於剛性儲存槽，槽殼之柔性將使其地震反應大於承受相同激振之剛性儲存槽【3-8】；Tang【9】考慮槽內液體密度沿液體高度遞減，在動壓力推導上僅考慮衝擊壓力於流體-槽殼系統，忽略對流壓力所造成影響，其結果指出當液體高度與槽殼半徑比在 0.3 至 0.12 之間，非剛性儲存槽之地震反應可用剛性儲存槽結果來估計。

國內有關儲存槽耐震問題之研究不多。賴世聲與蔡益超【10】針對中油既有之大型儲油槽，以簡化之質點集中動力模型探討儲油槽在地震作用下之

基本動力特性，並進行現場不同水位高度之微振動加速度量測，以驗證其理論分析，惟其分析模式並未對於儲槽內液體表面激盪運動行為加以模擬；田堯彰及王宗鴻【11,12】比較 API 650 與我國建築技術規則之設計反應譜，並針對油槽各種可能的破壞機制提出安全評估準則；陳永祥【13,14】應用防震水箱置於高樓建築頂層以進行減震效益評估，有關流體動力特性之模擬係引用非線性淺水波理論(Nonlinear shallow water theory)，建立水箱承受水平簡諧擾動之水分子運動方程式，再利用數值分析計算波高、波壓及水箱之剪力，並配合矩形水箱模型試驗加以驗證，此後更針對黏彈性基礎儲油槽之動力特性與地震反應進一步研究。

前述文獻中，僅考慮剛性或非剛性儲存槽在基座固定時之動力分析，而在隔震的情況下，欲建立槽殼與流體動力行為之解析模式，則必須結合流體動力與滑動結構之非線性動力理論。Wang 及 Jwo【15】、Wang, Teng 及 Chung【16】等人利用拉普拉斯方程式推導剛性儲存槽之流體動力分析模式，計算液面激盪反應及動態液壓，並根據動態液壓、基底剪力及翻覆力矩之關係建立等效彈簧—質塊系統，最後再與 FPS 隔震元件結合，建立隔震儲存槽之結構—流體動力方程式。王彥博、鄧敏政與鍾國懷【17】利用上述發展之理論分析，進行摩擦單擺支承隔震儲存槽之振動台試驗，其試驗結果顯示，在各種地震下摩擦單擺支承對儲存槽均有良好的減震結果，且地震強度愈大，減震效果愈顯著；數值模擬分析與試驗結果極為契合，顯示其理論分析模式足

以預測滑動隔震儲存槽之高度非線性結構-流體動力行為。有關非剛性儲存槽之隔震分析，目前僅見 Zayas 等人【1】利用有限元素分析 FPS 隔震儲存槽之動態反應，然而該研究報告並未提出結構一流體動力分析理論 (Structural-hydrodynamic) 之完整論述。

### 1.3 本文內容

本文主要針對非剛性儲存槽隔震之可行性進行研究。第二章為非剛性儲存槽之流體動力分析，首先利用拉普拉斯方程式推導含流體自由液面激盪之流場速度勢，進而利用 Lagrange's Equation 建立一足以忠實反應非剛性儲存槽動力特性之運動方程式(簡化徑向振動模態為一懸臂梁，且儲存槽斷面仍保持圓形)，並推導出非剛性儲存槽結構一流體耦合系統(shell-liquid coupled system)之動力方程式。第三章為非剛性儲存槽之隔震分析，主要推導非剛性儲存槽摩擦單擺隔震系統之運動方程式，並介紹非線性之數值解析模式。第四章為實例分析與參數研究，除了比較儲存槽以剛性模式分析與非剛性模式分析之差異外，更針對地震強度、FPS 曲率半徑及摩擦係數等參數進行分析，以充分檢驗非剛性儲存槽採用隔震之可行性，第五章為結論。