

第四章 非剛性儲存槽隔震結構之實例分析與參數研究

本章將根據第二章所建立之流體運動方程式及第三章所建立之非剛性儲存槽隔震結構進行參數分析，以了解摩擦單擺支承應用於非剛性儲存槽之隔震效益。

4.1 希臘Revithoussa LNG儲存槽

本文實例分析所採用之儲存槽為希臘 Revithoussa LNG 液態天然瓦斯儲存槽(圖 4.1)，其高度為 $L = 32.5m$ 、半徑為 $R = 34.5m$ ，槽殼厚度假設為 $h = 5cm$ ，槽內儲存之液體高度為 $H = 28m$ ，其結構參數整理於表 4.1。FPS 隔震器方面，本文採用取曲率半徑 $R_{FPS} = 1m$ (相當於 2sec 的隔震周期)，摩擦係數 $\mu = 0.05$ 。輸入震波則分別考慮 El Centro、Kobe 及 Northridge 等地震歷時資料，以了解不同頻率內涵之地表擾動對於儲存槽減震效益的影響。各輸入震波之加速度歷時及其富氏頻譜分別如圖 4.2 至圖 4.7 所示。

表 4.3 為非剛性儲存槽隔震前、後之特徵分析結果。其結果顯示，隔震系統的等效頻率為 0.63Hz，且隔震後液體的激盪模態與隔震前差異不大，惟槽殼的自然頻率則由隔震前的 5.5692 Hz 提高為隔震後的 8.6556 Hz。此外，槽殼的阻尼比則由隔震前的 2% 降為隔震後的 1.43%。

4.1.1 El Centro 地震

圖 4.8 至圖 4.9 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析(考慮徑向振動模態為一懸臂梁，且儲存槽斷面仍保持圓形)所得之液面波動位移歷時。其結果顯示，隔震與未隔震之儲存槽液面波動位移差異不大，且採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之液面波動位移亦十分一致。

圖 4.10 至圖 4.11 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之槽底動水壓歷時，其中動水壓可根據(2.2-1)式計算。分析結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低液體作用於槽殼之動水壓，峰值折減率可達 57%(表 4.6)，且採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之槽底動水壓歷時二者十分一致。



圖 4.12 與圖 4.13 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之儲存槽基底剪力歷時，其中基底剪力可根據(2.2-2)式計算，包括液體作用於槽殼的力量與槽殼本身的慣性力。分析結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低儲存槽之基底剪力，峰值折減率可達 58%(表 4.6)，且採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之槽底基底剪力歷時二者差異不大。

圖 4.14 與圖 4.15 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之儲存槽傾覆力矩歷時，其中傾覆力矩可根據(2.2-3)式計算，包括液體作用於槽殼的力量對槽底產生之力矩與槽殼本身之慣性力對槽底所產生之力矩。分析結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低儲存槽之傾覆力矩，

保護槽殼底部免於發生挫屈破壞，其峰值折減率可達 53%(表 4.6)，且採用剛性模式分析與非剛性模式所得之槽底傾覆力矩歷時二者差異不大。

圖 4.16 與圖 4.17 分別為非剛性 FPS 隔震儲存槽之槽殼頂部位移及加速度歷時。其結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低槽殼之振動反應，減少槽殼的受力變形，可提升儲存槽之耐震能力。

圖 4.18 與圖 4.19 分別為非剛性 FPS 隔震儲存槽之基底滑動位移歷時及 FPS 之遲滯迴圈。其結果顯示，基座滑動位移最大為 3.43cm，且歸位能力良好，殘餘位移僅 0.24cm。此外，由摩擦力及 FPS 回復力所得之基底剪力與由動水壓所得之基底剪力二者十分一致，說明本文所推導之流體動力方程式之合理性。



4.1.2 Kobe 地震

圖 4.20 至圖 4.21 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之液面波動位移歷時。其結果顯示，隔震與未隔震之儲存槽液面波動位移差異不大，且採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之液面波動位移亦十分一致。此外，隔震後液面波動的位移有放大的現象，可能與 Kobe 地震的頻率內涵具有 0.63Hz 的擾動成份有關。

圖 4.22 至圖 4.23 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之槽底動水壓歷時，其中動水壓可根據(2.2-1)式計算。分析結果

顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低液體作用於槽殼之動水壓，峰值折減率可達 40%(表 4.7)，且採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之槽底動水壓歷時二者十分一致。

圖 4.24 與圖 4.25 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之儲存槽基底剪力歷時，其中基底剪力可根據(2.2-2)式計算，包括液體作用於槽殼的力量與槽殼本身的慣性力。分析結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低儲存槽之基底剪力，峰值折減率可達 33%(表 4.7)，且採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之槽底基底剪力歷時二者差異不大。

圖 4.26 與圖 4.27 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之儲存槽傾覆力矩歷時，其中傾覆力矩可根據(2.2-3)式計算，包括液體作用於槽殼的力量對槽底產生之力矩與槽殼本身之慣性力對槽底所產生之力矩。分析結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低儲存槽之傾覆力矩，保護槽殼底部免於發生挫屈破壞，其峰值折減率可達 37%(表 4.7)，且採用剛性模式分析與非剛性模式所得之槽底傾覆力矩歷時二者差異不大。

圖 4.28 與圖 4.29 分別為非剛性 FPS 隔震儲存槽之槽殼頂部位移及加速度歷時。其結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低槽殼之振動反應，減少槽殼的受力變形，可提升儲存槽之耐震能力。

圖 4.30 與圖 4.31 分別為非剛性 FPS 隔震儲存槽之基底滑動位移歷時及 FPS 之遲滯迴圈。其結果顯示，基座滑動位移最大為 29.7cm，且歸位能力良

好，殘餘位移僅 0.73cm。此外，由摩擦力及 FPS 回復力所得之基底剪力與由動水壓所得之基底剪力二者仍十分一致，說明本文所推導之流體動力方程式之合理性。

4.1.3 Northridge 地震

圖 4.32 至圖 4.33 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之液面波動位移歷時。其結果顯示，隔震與未隔震之儲存槽液面波動位移差異不大，且採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之液面波動位移亦十分一致。同樣地，隔震後液面波動的位移有放大的現象，可能與 Northridge 地震的頻率內涵具有低頻及 0.63Hz 的擾動成份有關。

圖 4.34 至圖 4.35 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之槽底動水壓歷時，其中動水壓可根據(2.2-1)式計算。分析結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低液體作用於槽殼之動水壓，峰值折減率可達 32%(表 4.8)，且採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之槽底動水壓歷時二者十分一致。

圖 4.36 與圖 4.37 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之儲存槽基底剪力歷時，其中基底剪力可根據(2.2-2)式計算，包括液體作用於槽殼的力量與槽殼本身的慣性力。分析結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低儲存槽之基底剪力，峰值折減率可達 18%(表 4.8)，且採用剛性

模式分析與非剛性模式分析所得之槽底基底剪力歷時二者差異不大。

圖 4.38 與圖 4.39 分別為 FPS 隔震儲存槽採用剛性模式分析與非剛性模式分析所得之儲存槽傾覆力矩歷時，其中傾覆力矩可根據(2.2-3)式計算，包括液體作用於槽殼的力量對槽底產生之力矩與槽殼本身之慣性力對槽底所產生之力矩。分析結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低儲存槽之傾覆力矩，保護槽殼底部免於發生挫屈破壞，其峰值折減率可達 21%(表 4.8)，且採用剛性模式分析與非剛性模式所得之槽底傾覆力矩歷時二者差異不大。

圖 4.40 與圖 4.41 分別為非剛性 FPS 隔震儲存槽之槽殼頂部位移及加速度歷時。其結果顯示，儲存槽以 FPS 隔震後可降低槽殼之振動反應，減少槽殼的受力變形，可提升儲存槽之耐震能力。

圖 4.42 與圖 4.43 分別為非剛性 FPS 隔震儲存槽之基底滑動位移歷時及 FPS 之遲滯迴圈。其結果顯示，基座滑動位移最大為 38.3cm，且歸位能力良好，殘餘位移僅 1.36cm。同樣地，由摩擦力及 FPS 回復力所得之基底剪力與由動水壓所得之基底剪力二者仍十分一致。

4.1.4 非剛性儲存槽之槽殼效應

由 4.1 節之分析結果顯示，採用非剛性模式分析(考慮徑向振動模態為一懸臂梁，且儲存槽斷面仍保持圓形)與採用剛性模式分析所得之波動位移、動水壓力、基底剪力及傾覆力矩均差異不大，因此本研究嘗試將儲存槽之厚度由

5cm 分別降為 4cm 與 3cm，使槽殼更具柔性，以探討槽殼厚度對於減振效益之影響。表 4.4 與表 4.5 分別為隔震前、後，不同槽殼厚度之特徵分析結果。其結果顯示，當水位高度相同時，槽殼愈薄，則流體及槽殼之振動頻率將變小。圖 4.44 至圖 4.51 為槽殼厚度為 3cm 時，儲存槽受到 El Centro 地震擾動下之振動反應。若將此反應與槽殼厚度為 5cm 所得之結果進行比較可發現，槽殼較薄者(3cm)，其頂部位移較大，且隔震後槽殼的加速度於地震將結束時並沒有遞減的趨勢。波動位移、動水壓力、基底剪力及傾覆力矩於不同槽殼厚度下，其反應則會略大於槽殼厚度為 5cm 之振動反應。此外，由摩擦力及 FPS 回復力所得之基底剪力(圖 4.51)此時則小於由動水壓所計算之基底剪力。



4.2 參數分析

4.2.1 儲存槽液面高度與半徑比(H/R)之影響

本節將探討不同液面高度與半徑比對於非剛性儲存槽之減震效益的影響。當液面高度不同時，流體除了質量改變外，流體之振盪頻率亦隨之改變，進而影響流體之動力反應。圖 4.52 至圖 4.54 液面高度與半徑比對於非剛性儲存槽隔震效益之影響。其結果顯示，非剛性儲存槽以摩擦單擺支承隔震後，不論儲存槽之存量多寡，其動水壓力、基底剪力與傾覆力矩之峰值折減率皆維持在一定範圍，波動不大。

4.2.2 隔震器曲率半徑(R_{FPS})之影響

圖 4.55 至圖 4.57 為隔震器曲率半徑對於非剛性儲存槽之減震效益的影響。其結果顯示，當摩擦係數相同時(5%)，不同曲率半徑的條件下，非剛性儲存槽之動力反應峰值於隔震後均有超過 50%之減震效果，且折減百分率保持平穩，不隨曲率半徑而變。

4.2.3 地震強度($P.G.A.$)之影響

圖 4.58 至圖 4.60 為在 El Centro 地震下，不同地震強度對於非剛性儲存槽之減震效益的影響。整體而言，當摩擦係數相同時(5%)，動水壓力、基底剪力及傾覆力矩隨著地震強度愈大，其峰值折減率亦呈現遞增的趨勢，惟地震強度大於 0.5g 後，峰值折減率則趨於平緩。

圖 4.61 至圖 4.63 則為在 El Centro 地震下，地震強度與摩擦係數對於非剛性儲存槽之減震效益的影響。其結果顯示，當地震強度愈大時，不論儲存槽以何種摩擦係數之隔震進行器隔震均有良好的減震效果，且摩擦係數較大者(大於 6%)，減震效果較佳。

4.2.4 隔震器摩擦係數(μ)之影響

圖 4.64 至圖 4.66 為隔震器摩擦係數對於非剛性儲存槽之減震效益的影響，此處將地震強度($PGA=0.34g$)與隔震器曲率半徑($R_{FPS}=1m$)均保持定值。其結果顯示，當摩擦係數小時(5%以內)，隔震效果最好；隨著摩擦係數的增

加，峰值折減率則呈現遞減的趨勢，當摩擦係數較大時(20%)，其行為猶如未隔震的情況(停滯狀態)，故折減率逐漸趨近於零。

