

行政院原子能委員會
放射性物料管理局
委託研究計畫研究報告

用過核子燃料中期貯存設施於
地震事件下結構完整性

計畫編號：922003FCMA003

受委託機關：核能研究所

計畫主持人：陳建忠

報告日期：中華民國九十二年十二月二十九日

The Structural Integrity of Spent Fuel Storage Casks under Seismic Events

ABSTRACT

By

Jien-Jong Chen

This report describes the seismic analyses performed and results obtained for the independent spent fuel storage installations (ISFSI) which could be constructed at the Taiwan Power Company Chinshan Nuclear site in the northern region of Taiwan. It described the seismic-analysis bases, methodology, models, and cases considered in the design analysis phase and presents the design load envelopes, design values of maximum response accelerations for ISFSI seismic analysis.

The simulation of the seismic behavior and verification of the structural integrity of Holtec's HI-STORM 100[®] free standing independent spent fuel storage installations under extremely seismic loading conditions is executed.

The time-history is generated by STARDYNE[®] from design earthquake of safety shutdown for ChinShan's Site. Then, the dynamic soil properties under seismic loading are calculated by SHAKE91[®]. The soil-structural interaction of pad with ISFSI is study by using the NRC generally accepted SASSI program with employing the dynamic soil data obtained from SHAKE91. The dynamic behaviors of Holtec's free standing storage cask are analyzed with enveloped maximum time-history which obtained from SASSI[®] by using ANSYS/LS-DYNA[®], a famous explicit code for nonlinear dynamic simulation. The various coefficients and seismic input level are also studied.

From the above analyses, the storage cask will slide but not

collide to the neighboring cask under two types of cask arrangement during medium and highest seismic input level, and the overturning will not occur while extremely seismic conditions. Such that, the structural integrity is still remain during and after earthquake without any further analysis.

The comparison of dynamic stability of NUHOMS[®] and Holtec HI-STORM-100[®] during seismic event by using quasi-static method is studied in this report, by the way, the seismic stability of HI-STORM-100[®] cask is also compared.

The newly regulation development on the probobalistic risk analysis for determining the design earthquake of ISFSI are reviewed. For a general licensee, ChinShan site, the dynamic soil-structural interaction between pad and cask is compulsory by 10CFR72.

Keywords: time-history, dynamic soil properties, soil-structural interaction, transient dynamic analysis, independent spent fuel storage installtions, seismic analysis.

用過核子燃料中期貯存設施於地震事件下結構完整性

摘要

陳建忠

本報告之目的在於說明，對可能用於我國台電公司核一廠之用過核子燃料中期貯存設施之地震分析及貯存設施結構完整性評估。內容包含中期貯存設施之地震設計分析所應考量之各項分析基礎、方法、分析模型與分析狀況等。

由於 Holtec's HI-STORM 100[®] 的貯存罐可能入選為核一廠用過核子燃料獨立中期貯存設施，且因為其設計為自由站立之獨立圓筒，重心遠平置式的 NUHOMS[®] 為高其動態穩定性相對較差。因次，本計畫以其為目標進行地震下貯存罐動態行為的模擬，並探討其結構的完整性。

經由核一廠最新版終期安全分析報告所取得的安全停機地震設計反應譜，使用 STARDYNE[®] 程式建立對應的歷時圖，並依據 NUREG-0800 驗證所求得之反應譜。然後，依據核一廠用過核子燃料中期貯存設施預定廠址的地質鑽探資料，進行土壤動力特性分析；經由 SHAKE91[®] 程式可獲得廠址之土壤動力特性及含土壤放大效應之地表反應譜。接著使用美國核管會普遍接受的 SASSI[®] 程式，進行土壤結構互制分析；分析時參考泰興公司對核一廠用過核子燃料中期貯存設施之基礎板放置貯存罐的規劃，進行放置 4 罐及放置 68 罐條件下的基礎板動力特性分析。接著使用非常著名的非線性動力分析程式 -ANSYS/LS-DYNA[®]，進行自由站立條件下的貯存罐動力分析；分析的狀態包含，考慮不同摩擦係數以模擬不同的接觸條件及以土壤-結構互制分析所得之最大地震(1.0g)下不同等級的輸入地震值，以模擬不同程度地震之影響。

經由分析結果可得知，當發生地震時貯存罐會發生不同程度的滑移，但參考 Holtec 的標準設計，基礎板上放置貯存罐的兩種標準方式，並不會產生相鄰貯存罐相互碰撞的狀況，同時在發生最大地震時，也不會發生貯存罐傾倒的問題；因此，可確保地震事件下的貯存罐結構完整性。

此外，本報告亦以 NUHOMS[®]的準靜態評估方式，計算 Holtec HI-STORM 100[®]於地震負荷下結構穩定性，並與 NUHOMS[®]的穩定性進行比較。同時，亦比較 Holtec 準靜態穩定性分析與非線性動態分析穩定性之差異，經比較結果得知，準靜態分析的結果具有相當高的裕度。

最後，本報告並整理 92 年 10 月美國 NRC 所發行的兩個新的規範。其一是修定 10CFR72，將地震危害度分析，列為中期貯存場址特定執照者(Specific license)制訂設計地震的必要選項增。其二是頒布管制指引 3.73 以說明管制局認為符合 10CFR72 以機率論法制訂設計地震的立場，並指導如何進行相關的工作，對通用執照者(General licensee)則要求須進行土壤-結構互制分析。

關鍵字：用過核子燃料、中期貯存設施、歷時圖、土壤動力特性、土壤結構互制、暫態動力分析、地震分析。

目 錄

	頁碼
英文摘要	i
中文摘要	iii
目錄	v
圖目錄	viii
表目錄	xii
1. 簡介	1
1.1 前言	1
1.2 內容架構	3
2. 分析背景	5
2.1 中期貯存設施說明	5
2.2 HOLTEC HI-STORM-100 貯存罐特性	7
2.3 場址地質特性	10
2.4 地震分析簡介	13
2.4.1 地震反應譜	13
2.4.2 模態組合	17
3. SSI 分析原理方法與過程說明	19
3.1 設計分析規範	19
3.2 分析原理及方法	22
3.2.1 SHAKE 91 等效線性化	22
3.2.2 SASSI 土壤-結構互制分析	26
3.3 分析模型及過程描述	30
3.3.1 等效線性化核一廠土壤動力特性	30
3.3.2 土壤-結構互制分析	34

4. HI-STORM 100 貯存設施滑動和翻覆分析	36
4.1 LS-DYNA 分析	36
4.2 滑動和翻覆動力分析	38
4.3 HI-STORM 100 動力分析模型描述	39
4.4 分析結果與討論	40
4.5 結論	41
5. NUHOMS®和 HOLTEC 貯存設施穩定性分析	43
5.1 滑動和翻覆條件	44
5.2 NUHOMS®貯存設施滑動和翻覆分析	49
5.3 HOLTEC 貯存設施滑動和翻覆分析	52
5.4 結論	53
6. 地震法規研議	55
6.1 最新地震法規的研議	55
6.2 美國核管會法規指引 3.73	57
6.3 其他	59
7. 結論與建議	60
7.1 分析結果	60
7.2 檢討與建議	62
參考資料	63
附錄 A 核一廠 C-9 鑽孔資料輸入檔案範例	152
附錄 B 土壤-結構互制分析	156
附錄 C 用過核子燃料乾式獨立貯存設施與受監測可取出的 貯存設施之設計場址選擇所須考量的地質學及地震 學的特徵	187
附錄 D 管制指引 3.73：用過核子燃料乾式獨立貯存設施及	213

	受監測可取出貯存設施廠址評估及設計地震地表運動的決定	
附錄 E	用過核子燃料中期貯存設施於地震事件下結構完整性計畫報告審查意見及回覆	230

圖 目 錄

		頁碼
圖 2. 1	HI-STORM 100 [®] 貯存情形(取自 Holtec SUMMARY8)	82
圖 2. 2	MPC 構造示意圖(取自 Holtec SUMMARY8).....	83
圖 2. 3	HI-STORM 100 [®] 防護層剖面示意圖(取自 Holtec SUMMARY8).....	84
圖 2. 4	HI-TRAC [®] 實體圖(取自 Holtec SUMMARY8).....	85
圖 2. 5	HI-TRAC [®] 構造示意圖(取自 Holtec SUMMARY8)...	86
圖 2. 6	HI-STORM 100 [®] 操作示意圖(1)(取自 Holtec SUMMARY8).....	87
圖 2. 7	HI-STORM 100 [®] 操作示意圖(2)(取自 Holtec SUMMARY8).....	88
圖 2. 8	HI-STORM 100 [®] 操作示意圖(3)(取自 Holtec SUMMARY8).....	89
圖 2. 9	理想單自由度系統示意圖	90
圖 2. 10	核一廠地震反應譜(取自核一廠提供資料).....	91
圖 2. 11	被理想化的反應譜	92
圖 3. 1	一維土壤水平土層理想化特性圖 (取自 SHAKE 91 USER'S MANUAL)	93
圖 3. 2	SHAKE 91 [®] 程式主要架構 (取自 SHAKE 91 USER'S MANUAL)	94
圖 3. 3	SASSI [®] 柔性體積次結構法示意圖	95
圖 3. 4	鑽孔、震測線位置圖(取自台電核一廠地質調查報告)	96
圖 3. 5	C-9 鑽孔地質柱狀剖面圖 (1)(取自台電核一廠地質調查報告)	97

圖 3.6	C-9 鑽孔地質柱狀剖面圖 (2) (取自台電核一廠地質調查報告)	98
圖 3.7	C-9 鑽孔地質柱狀剖面圖 (3) (取自台電核一廠地質調查報告)	99
圖 3.8	C-7、C-9、C-12 波速及動態模數表 (取自台電核一廠地質調查報告)	100
圖 3.9	C-9 鑽孔縱、橫波及動態模數圖 (取自台電核一廠地質調查報告)	101
圖 3.10	核一廠地震加速度歷時記錄(由 SIMQKE 建立).....	102
圖 3.11	核一廠地震加速度歷時記錄(由 STARDYNE 建立)...	103
圖 3.12	實驗室對應剪應變之模數折減與阻尼比曲線圖(取自 SHAKE 91 USER'S MANUAL)	104
圖 3.13	對應剪應變之模數折減曲線圖	105
圖 3.14	對應剪應變之阻尼比曲線圖	106
圖 3.15	反應譜加速度圖	107
圖 3.16	計算後加速度反應譜	108
圖 3.17	計算後放大反應譜圖	109
圖 3.18	位於地下 6.8 ft 剪應力歷時圖	110
圖 3.19	位於地下 6.8 ft 剪應變歷時圖	111
圖 3.20	反應譜加速度圖	112
圖 3.21	計算後加速度反應譜	113
圖 3.22	計算後放大反應譜圖	114
圖 3.23	位於地下 7.96 ft 剪應力歷時圖	115
圖 3.24	位於地下 7.96 ft 剪應變歷時圖	116
圖 4.1	HI-STORM 100 [®] 示意圖(一)	117

圖 4. 2	HI-STORM 100 [®] 示意圖(二)	118
圖 4. 3	中期貯存設施貯存場地地震歷時圖	119
圖 4. 4	HI-STORM 100 [®] 滑動和翻覆有限元素分析模型	120
圖 4. 5	HI-STORM 100 [®] 貯存設施標準排列示意圖	121
圖 4. 6	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況	122
圖 4. 7	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況	124
圖 4. 8	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況	126
圖 4. 9	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況	128
圖 4. 10	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況	130
圖 4. 11	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況	132
圖 4. 12	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況	134
圖 4. 13	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況	136
圖 4. 14	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況	138
圖 4. 15	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況	140

況	
圖 4. 16 HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 1.0\text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情 況	142
圖 4. 17 HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 1.0\text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情 況	144
圖 4. 18 HI-STORM 100 [®] 貯存設施於地震作用下滑動距離	146
圖 4. 19 HI-STORM 100 [®] 貯存設施於地震作用下傾斜角度	146
圖 5. 1 NUHOMS [®] 貯存設施-水平貯存模組	147
圖 5. 2 NUHOMS [®] 貯存設施-乾式屏蔽罐	147
圖 5. 3 NUHOMS [®] 貯存設施-運送罐	148
圖 5. 4 NUHOMS [®] 貯存設施-傳送設施	149
圖 5. 5 NUHOMS [®] 貯存設施-水平貯存模組斷面尺寸	149
圖 5. 6 物體翻覆示意圖(一)	150
圖 5. 7 物體翻覆示意圖(二)	150
圖 5. 8 NUHOMS [®] 貯存設施滑動和翻覆分析示意圖	151

表 目 錄

		頁碼
表 3. 1	地質特性資料表	31
表 4. 1	HI-STORM 100 [®] 貯存設施設計參數 HI-STORM 100 貯存設施在各種條件下的滑動和翻覆情形	71
表 4. 2	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析 歷時記錄.....	72
表 4. 3	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析歷 時記錄	74
表 4. 4	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析歷 時記錄.....	76
表 4. 5	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析歷 時記錄.....	78
表 4. 6	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析歷 時記錄.....	80
表 4. 7	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析歷 時記錄.....	82
表 4. 8	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析歷 時記錄.....	84
表 4. 9	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析歷 時記錄.....	86
表 4. 10	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析歷 時記錄.....	88
表 4. 11	HI-STORM 100 貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析歷	90

	時記錄.....	
表 4. 12	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析歷 時記錄.....	92
表 4. 13	HI-STORM 100 [®] 貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析歷 時記錄.....	94
表 4. 14	HI-STORM 100 [®] 貯存設施在各種條件下的滑動和翻 覆情形.....	96
表 6. 1	在最終條例有效日起即以後的乾罐式貯存之 ISFSI 或 MRS	63

1. 簡介

本章主要說明計畫的緣起，對本計劃之範圍、內容與架構做概略性的介紹。

1.1 前言

在我國的最終處置場尚未完成之前，國內沸水式核電廠必須面對用過核子燃料池(貯放用過核子燃料及高放射性核廢料-如損壞的控制棒)貯存空間可能發生嚴重不足的問題。因此，核一廠的用過核子燃料池用過核子燃料中期貯存設施的興建也成為台電公司當前的要務。

原子能委員會放射性物料管理局(以下簡稱物管局)為強化對興建用過核子燃料中期貯存設施的管制能力，確保其結構完整性；使其於任何設計、運轉及意外條件下，不致發生輻射物質外洩問題；以保障社會大眾及從業人員的安全。因此，在91年度委託核研所，以Transnuclear West 公司的標準化設計NUHOMS[®][1]為目標，依據NUREG-1536[3]規定，執行「用過核子燃料中期貯存設施之結構安全獨立驗算分析模式之建立計畫」[3]。分析採用ANSYS通用有限元素分析程式，針對主要的貯存設施-水平貯存模組與乾式屏蔽罐，進行結構應力分析獨立驗算模式的建立；分析時分別依據ASME Section III, Class 1[4]與 ACI-349 [5]等美國機械與土木設計規範，進行結構應力分析與容許應力檢核。以驗證NUHOMS[®]標準化設計的用過核子燃料中期貯存設施結構設計的安全性。經由分析可知，主要貯存設備-水平貯存模與乾式屏蔽罐之結構安全性，於承受設計負荷、正常操作、異常操作與地震意外事故下，各組件的應力均小於法規容許應力，顯示其設計可以承受各項嚴苛的設計負荷[3]。

然台灣位處太平洋板塊、歐亞大陸板塊及菲律賓板塊等三大板塊的交會地帶，是全世界地震最活躍的區域之一，地震所發生強度與頻率均相當高。台電公司就曾與美國電力研究所(Electrical Power Research Institute, EPRI)在花蓮與羅東兩地，進行過兩次長時間地震活動的監測計畫-花蓮計畫與羅東計畫，以建立板塊活動與地震強度間的關係。物管局有感於台灣地區興建用過核子燃料中期貯存設施抗震能力的重要性，於是於本年度(92)再度委託核研所進行用過核子燃料中期貯存設施於地震事件下的結構完整性分析。針對用過核子燃料中期貯存設施的耐震能力進行深入的檢討。

由於現行最普遍的混凝土構造的用過核子燃料中期貯存設施為(1)水平貯放的NUHOMS[®]混凝土模組與(2)Holtec公司所設計直立式貯放的HI-STORM 100[®][6]圓筒形混凝土護箱。可想而知，NUHOMS[®]的水平橫置式貯存罐的重心較低，故其動態穩定性遠較HI-STORM 100[®]圓筒形直立式混凝土貯存護箱的穩定性佳，但未來台電公司所興建的用過核子燃料中期貯存設施，乃是採用公開招標的方式，為得到分析結果較佳的保守度，因此於成立計畫之初，即與物管局討論決定以Holtec公司HI-STORM 100[®]圓柱形混凝土護箱為目標，進行地震事件下結構完整性分析，分析時並實際考慮廠址地層土壤特性，以探討實際地震作用下，用過核子燃料中期獨立貯存設施的結構安全性。

計畫成立之初，雖然尚未訂定最新用過核子燃料中期貯存設施的地震設計規範，相關地震設計僅須參考 10CFR100 附錄 A[7]。但經國外專家告知，美國核管會已要求對放置貯存罐的基礎板及附近區域，須進行土壤-結構互制分析 (此部分已於 10CFR72.212(b)(2)(i)(B)最新法規中證實，除須考慮靜態負荷外，亦須考慮自由站立之貯存設施受地震作用下，與基礎板與區域互動所產生的動態負荷分析)。因此，本

計畫即以 Holtec 混凝土護箱為目標，考量土壤動力特性，並執行土壤結構互制分析(Soil-Structure Interaction, SSI)，求取貯存罐基礎板的實際地震反應譜，再利用基礎板反應譜進行貯存罐結構的地震動態安全分析，以驗證 HI-STROM 100[®]，是否可承受廠址設計地震的能力。

1.2 內容架構

本年度計畫的執行，完全比照核能電廠的地震設計分析方式模式進行；首先從核一廠的最終安全評估報告[8]，取得核一廠最新的自由地表設計反應譜，及由台電後端處獲得核一廠中期貯存場址地質鑽探報告[9]，以取得土壤與地質資料，然後分別採用 SIMQKE[®]程式(美國 GE 對核四廠設計採用相同的程式)與 Stardyne[®]程式建立歷時圖，由於 Stardyne[®]程式所建立的歷時圖，依據 NUREG-0800[10] 電廠標準審查計畫(Standard Review Plan) 3.7.2 節規定，完成反應譜的檢驗。因此，後續的分析即以 Stardyne[®]所建立的歷時圖為本計畫分析的依據。其次是使用 SHAKE91[®][11]土壤線性動力分析程式，進行土壤動態特性的分析，以探討於地震力作用下與應變相容(Strain-compatible)的等效線性土壤/岩盤特性，並建立含考量廠址土壤動力特性的歷時圖，其中等效線性土壤/岩盤特性，包含對應有效剪應變之剪力模數與阻尼值。經由 SHAKE91[®]程式所獲得之土壤動力特性資料及歷時圖，可提供委外進行土壤-結構互制分析，以探討由自由地表至貯存罐基礎板的歷時圖放大效應(附錄 B)。接著本計畫採用板元素以 ANSYS/LS-DYNA[®][12]程式進行貯存護箱的模型建立，並配合經由土壤-結構互制分析所獲得的基礎板地震歷時圖，進行貯存設施於地震事件下的動態模擬。分析時，同時對基礎板與混凝土護箱間的摩擦係數與最大加速度，進行敏感度分析。摩擦係數範圍由 0.2 到 0.6，而

最大加速度範圍則由 0.3g 到 1.0g。

此外，計畫亦採用 NUHOMS[®] 準靜態地震穩定性的分析方式，進行 HI-STROM 100[®] 地震穩定性分析，並經由兩者地震穩定性的比較，以比較兩種設計在地震發生時的安全餘裕。並且經由比較 HI-STROM 100[®] 準靜態與非線性動態的地震穩定性，以了解準靜態分析方法的設計裕度。

最後，本計畫並對用過核子燃料中期貯存設施的地震相關規範與最新地震規定進行蒐集與整理。

因此，除本章對整個計畫做簡單介紹外，其餘各章內容簡介如下：

第 2 章 係說明分析目標的設計與廠址特性，內容包括用過核子燃料中期貯存設施、Holtec HI-STORM-100[®] 貯存罐的特性、核一廠廠址地質特性、地震分析程序等。

第 3 章 介紹土壤-結構互制作用分析，包括分析原理、模型及規範，並說明使用工具程式。

第 4 章 為貯存罐非線性暫態動力分析，包括動力分析原理、模型及規範。並以摩擦係數與最大加速度等兩參數，進行 Holtec HI-STROM 100[®] 貯存罐敏感度分析。

第 5 章 說明 NUHOMS[®] 標準化中期貯存設施地震分析方法，並比較 Holtec HI-STORM-100[®] 與 NUHOMS[®] 之穩定性，及評估 Holtec HI-STROM 100[®] 的靜態穩定性與動態穩定性差異。

第 6 章 介紹最新的用過核子燃料中期貯存設施地震相關法規。

第 7 章 結論與建議。

最後是參考資料與附錄。

2.分析背景

由於用過核子燃料中期貯存設施地震分析問題牽涉廣泛，為了對相關背景能有較具體的認識，本章先簡述用過核子燃料中期貯存設施的概念；再介紹分析標的物-Holtec 貯存罐的結構設計及核一廠廠址的地質特性，最後說明地震分析的方法。

2.1 中期貯存設施說明

用過高放射性核燃料的處理一般可分兩種：

- (1) 對用過核子燃料進行再處理與使用：用過核子燃料經過再處理後可作為其他核反應器的燃料，進行另一階段的核能反應。
- (2) 進行用過核子燃料的中長期貯存。

就核燃料再處理而言，目前全世界僅有少數國家具有核燃料再處理工廠，而國內目前並無此設施；再則核燃料再處理後的使用技術仍處於研究階段，且我國亦無相關研究計畫。因此，台電公司對高放射性廢料的處理，傾向採取中長期貯存的方式。

對於高放射性核廢料的處置，一勞永逸的方式就是建立最終處置場，進行長期貯存，讓具高放射性的物質，依其半衰期逐漸遞減。然而，由於政治與環保的因素，國內目前連低放射性廢料的最終處置場到現在都還沒著落。因此，對於建立高放射性的最終處置場，相形就更顯得困難了。

但鑒於國內三座核能電廠用過核子燃料池的空間設計，並不足以完全貯放營運期間所產生的用過核子燃料。雖然國內三座核能電廠，也因此分別進行過一次以上的用過核子燃料池格架佈局重整。然而，據現有貯放空間估計，核一、二廠的用過核子燃料池，亦將分別於民

國 97、98 年及民國 98、99 年用罄。屆時核一、二廠仍將可能因受限於用過核子燃料池的貯放空間不足，而被迫停止運轉。再加上近年來核一、二廠因部分控制棒的結構出現問題，又將這些高放射性的問題控制棒暫時存放於用過核子燃料池，這對用過核子燃料池的空間使用，更顯得捉襟見肘。因此，為解除因燃料池空間不足所可能造成的運轉限制，及早規劃用過核子燃料的處理，就更顯出其重要性。

依據美國核管會(USNRC)的建議，對於高放射性廢料的貯存可採用濕式貯存與乾式貯存兩種，將用過核子燃料貯放於廠內的用過核子燃料池即是濕式貯存方法之一；而乾式貯存則是於廠內或廠外適當地點，以混凝土模組、混凝土護箱及混凝土窖等方式進行乾式貯存，目前多數中期貯存設施均採用乾式貯存方式。

目前台電公司對於用過核子燃料的貯存規劃可分為三個階段，(1)短期-放置於用過核子燃料池進行冷卻；(2)中期-乾式貯存；(3)長期-放置於最終處置場。衡量上述各項客觀條件，供應短期的用過核子燃料池空間即將用完，而最終處置場又非短時間內可確定；因此，建立第二階段的乾式中期貯存設施(Interim Storage Facility)更顯出其迫切的需要性。台電公司計劃於核一廠內興建一座用過核子燃料中期貯存設施，以便在最終處置場運轉之前，能貯存陸續從反應爐內取出之用過核子燃料或高放射性核廢料。

乾式貯存設施的興建，除在設計及建造過程中必須符合核能級品質要求並通過檢驗合格外，亦必須依據政府法令取得營運許可後才能使用。其對於結構設計的要求更是十分嚴謹，必須依據 10CFR72[13]、ANSI/ANS 57.9[14]考慮正常、異常操作條件的運轉負荷外，進一步需要考慮各種天然或人為的意外事件所可能承受的負荷(如地震、洪水、拋射物撞擊...等)，以確保用過核子燃料在密封貯存

期間，不會釋出任何放射性物質，保護社會大眾與工作人員的安全。

物管局因業務需要，對台電公司提出之用過核子燃料中期乾式貯存設施負有管制與安全審查等任務。因此，物管局分別於中華民國八十四年七月三日公佈「用過核子燃料廠內乾式貯存設施設置管制規範」[15]，與中華民國八十六年一月二十三日公佈「用過核子燃料廠內乾式貯存設施安全分析報告導則」[16]。此外，為強化審查時獨立驗證分析能力，亦於 89、90 年委託核研所核工組建立中期貯存設施的臨界與熱流安全分析獨立驗證模式[17]，於 91 年度委託核研所工程組進行結構安全分析獨立驗證模式之建立[3]，建立用過核子燃料中期貯存設施的結構獨立驗算能力。

為配合核一、二廠用過核子燃料乾式貯存的需求，台電公司早於民國 74 年起，即開始規劃中期貯存設施的興建，並自 78 年起進行「核一、二廠用過核子燃料中期貯存可行性評估研究」。經評估後認為，目前已廣為使用的混凝土模組、混凝土護箱、混凝土窖、金屬護箱等四種乾式貯存的方法，均符合我國台電公司之安全需求。

然考量貯放設施廠址、空間的限制及由於 COGEMA、Holtec 公司等多家公司所設計的標準化用過核子燃料獨立運輸及貯存設施，已經獲得美國核能管制委員會(USNRC)的商品化認證，其產品很有可能被台電公司入選為核一廠之用過核子燃料中期貯存設施。因此，物管局要求本計劃以 Holtec 公司的標準化設計 HI-STORM 100 為目標，執行「用過核子燃料中期貯存設施於地震事件下結構完整性」分析。

2.2 HOLTEC HI-STORM-100[®]貯存罐特性

HI-STORM 乃是 Holtec International Storage and Transfer Operation Reinforced Module 的縮寫，該系統係用以裝載、運輸及貯

存用過核子燃料[6]，其貯存情況如圖 2.1 所示。HI-STORM-100[®]系統主要包括三部份：

- (1) 可替換的多用途容器 (Multi-Purpose Canister, MPCs)
- (2) 貯藏用外包裝貯存護箱 (HI-STORM 100[®])
- (3) 運送用包裝貯存護箱 (HI-TRAC[®])

其中 MPC 為存放燃料棒之容器，HI-STORM 100[®]為貯藏期間存放 MPC 的貯存護箱，HI-TRAC[®]則為裝載、運送期間存放 MPC 的貯存護箱。

各組件的詳細功能及結構如下所述：

(1)MPC

MPC 係 Multi-Purpose Canister 之縮寫，為存放用過核子燃料棒與高放射性廢料之多用途容器，如圖 2.2 所示。MPC 構造為兩端平板的圓柱狀結構物，每個 MPC 內部放置蜂巢狀的燃料棒框架、底板、容器壁、蓋板及密封環，蜂巢狀的燃料棒框架並呈現正交結構，此種結構設計在意外發生時可發揮最大的強度。除中子吸收器及鋁導熱管外，MPC 整體係由不銹鋼合金製成，不含碳鋼。

MPC 是用過核子燃料的阻絕系統，容器壁、底板、蓋板及密封環則是主要的阻絕組件，而蜂巢狀的框架設有中子吸收器，則可提供緊急狀況中子臨界的控制。

MPC 分為 MPC-24、MPC-32 及 MPC-68 等三種主要型式，其中 MPC-24 又有同系列的 MPC-24E、MPC-24EF，而 MPC-68 亦有同系列的 MPC-68F、MPC-68FF；MPC-24、MPC-32 及 MPC-68 的最大容量分別為 24、32 及 68 根燃料棒，而 MPC-24、MPC-32 主要為裝載 PWR 系列之燃料棒，MPC-68 則主要裝載 BWR 系列之燃料棒。雖然容量有別，但 MPC 的所有型號外型尺寸均一致，總高度為均為 190.31

in，外徑為 68.375 in，這個尺寸特性可使它們替換存放於 HI-STORM 100[®] 或 HI-TRAC[®] 的貯存與運送設施中。

(2) HI-STORM 100[®]

HI-STORM 100[®] 貯存護箱係為直立底部可通氣的圓柱狀鋼筋混凝土結構物，如圖 2.3 所示，在貯存期間提供 MPC 適當的屏蔽及結構性的保護功能，當 MPC 貯存於其內時，可降低區域內的輻射劑量；該護箱的設計足以忍受強風、高能量的電擊及其他的自然現象。

HI-STORM 100[®] 護箱本體為由鋼板及混凝土所組成的厚壁式圓柱形容器；其側壁構造為內外兩層碳鋼板間夾著厚純混凝土壁，所使用的碳鋼需符合 ASME 的相關規定；HI-STORM 100[®] 於底部設有四個空氣進氣口，並於頂部設有四個空氣排氣口，以容許空氣於護箱中自然循環，自然的冷卻位於其中的 MPC；內壁並附有柔軟的導管以協助安放及取出 MPC 時，可吸收衝擊力量及避免直接撞擊本體，該導管並允許空氣流通以冷卻護箱本體。

HI-STORM 100[®] 並有同系列的規格 HI-STORM 100S，HI-STORM 100S 與 HI-STORM 100[®] 的唯一不同點在於 HI-STORM 100S 將蓋板加厚，以容納四個位於頂端的排氣孔。如此一來，HI-STORM 100S 本體便較 HI-STORM 100 為短，若不加上頂蓋時，可使用卡車加以運送，如此載運時將方便許多。另外，HI-STORM 100A 及 HI-STORM 100SA 是 HI-STORM 100 族群的第三種變化，它特別的地方是具有延伸的底板以及三角襯料(gusset)，以便能將外圍護箱錨定在 ISFSI 的基礎板上，係屬於高耐震之應用。

(3) HI-TRAC[®]

HI-TRAC[®] 護箱提供 MPC 在裝載、卸載及運送期間屏蔽及結構性

的保護，如圖 2.4、圖 2.5 所示，該護箱係為複壁式的圓柱形容器，容器壁為內外兩層為碳鋼，中央為鉛所構成，其外並有一層”水夾克”(water jacket)。在 HI-STORM 100[®]系統中，HI-TRAC[®]之型式有 125-TON HI-TRAC[®]及 100-TON HI-TRAC[®]兩種，該重量標示係在裝載、卸載及運送等操作期間所能承受之最大重量，兩種型式的內徑是相同的，只是 125-ton HI-TRAC[®]有較厚的鉛層及水屏壁，因此具有較厚的外徑。

HI-TRAC[®]護箱具有緊急安全設計，特殊情況下可由底部取出或置入 MPC；該護箱之結構設計強度亦足以容忍錯誤操作或自然環境之變化，並盡量提供最佳效果之屏壁。

在實際操作使用中，用過核子燃料棒，應先貯存 MPC 中，再將 MPC 安置於 HI-TRAC[®]中運送，待到達貯存地點，然後將 MPC 卸載並安置於 HI-STORM 100[®]中，置放於中期貯存設施內，這一系列的操作流程，以簡單的示意圖表現，如圖 2.6、2.7、2.8 所示。

2.3 場址地質特性

核一廠中期貯存設施現場場址之地形、地質概況，由已完成之地質調查報告[9]，可了解現場地形及相關地質特性如下：

核一廠現場場址位於核一廠西南隅緊鄰山邊之廠區內，呈南寬北狹坡度約 3/100 之狹長狀分佈，南側最寬處寬約 45 m，北側最狹處寬約 20 m，東側緊鄰乾華溪以乾華溪為天然界限，溪底與地表面平均高差約為 5 m，西側為平均坡度 30 度之凝灰角礫岩山區，以天然山脊為界，對岸則為電廠日用燃油槽區。現場植生狀況良好，山坡地區域長滿相思樹、梧桐樹及不知名之闊葉樹，平地區域目前係漫生茅草，並有些許喬、灌木穿插其間。

本場址地層分佈狀況，依地形變化可區分為平地與山坡地兩個區域，茲分別概述如下：

平地區域：

- (1) 0~1.3 m 為灰棕色沉泥質砂土偶夾礫石與腐木，厚度介於 0~2.5 m 之間，平均厚度約 1.3 m，。
- (2) 1.3m~7.3 m 為安山岩質卵礫石混夾棕灰色沉泥，砂土中部份卵石之直徑大於 1 m，大部份之卵石直徑均大於 15 cm 且質地堅硬，本層之厚度介於 3.0~10.4 m 之間，平均厚度約 6.0 m。
- (3) 7.3~35 m 為灰色泥質砂岩，膠結性差，遇水易鬆散，覆蓋層之下均屬本層。

山坡地區域：

- (1) 0~4.1 m 為灰棕色凝灰質土壤偶夾小礫石及極度風化之碎岩塊，厚度介於 2.1~5.0 m 之間，平均厚度約 4.1 m。
- (2) 4.1~17.1 m 為棕色凝灰質土壤混雜中度風化之凝灰角礫岩塊，厚度介於 2.9~35 m 之間，平均厚度約 13 m。
- (3) 17.1~31.7 m 為棕灰色沉泥質砂土與棕色凝灰質土壤夾安山岩質卵礫石，厚度介於 4~20.5 m 之間，本層安山岩塊之含量及粒徑大小均較上一層為大，而且安山岩塊之質地與平地區域 1.3~7.3 m 之卵礫石層相似均極為堅硬。
- (4) 31.7~55 m 為灰色泥質砂岩，膠結性差，遇水易鬆散。

以本場址而言，地層分佈由上而下，於 1.0~3.0 m 厚之表土層下為一平均厚約 6.0 m 之安山岩礫石層，其下即為岩層，均屬於良好之承載層，並無長期沈陷之顧慮。惟因土壤覆蓋厚度不均，再加上運轉期間混凝土桶的堆置並非均勻分佈，可能造成基礎不均勻沈陷問題。為克服此問題，可能的基礎型式宜採用樁基或筏基，應視需求及功能

性選擇適當基礎，此部份目前尚未定案，但在考量經濟效益及施工時程下，應以採用筏式基礎可能性較大。

本場址區域由於西側為山坡地，東側緊臨乾華溪，地形略微自西南向東北傾斜，於是緊臨之乾華溪遂成為區內之天然排水系統。排水方式主要為順應地形之地表漫流，經集流於乾華溪後再北流入海。

本場址貯存設施基地平面約定在 EL.+26 m，平地部分的地下水位標高約介於 EL.+18 m 與 EL.+22 m 之間，而且靠南邊近山側之水位較高，靠北邊近乾華溪側之水位較低。

候選場址內之地下水位大致與地形等高線相符，地下水流向同樣也受地形之影響，順著地形坡度自西向東流，而在地下凹谷位置地下水集中致使水量較大。

本場址岩盤面上之覆蓋層係屬安山岩塊，卵礫石夾雜沉泥質砂土，經滲漏試驗檢測，顯示區內土層與岩層之透水性均偏高，但未存在特殊之水層。

根據調查結果[9]，本地區之基盤岩石為桂竹林層，桂竹林層主要由淡灰色疏鬆的厚層泥質砂岩，灰黑色頁岩以及其互層所組成，泥質砂岩由石屑質混濁砂岩或亞混濁砂岩所構成，偶含有孔蟲及貝類化石，在台電委託益鼎公司的調查範圍內，桂竹林層被凝灰角礫岩所覆蓋，並沒有出露在地表，而由凝灰角礫岩的露頭調查及鑽孔所取得之基盤岩石裂面角度等資料研判則無不連續面存在，因此在核一廠的地表地質調查中並無不連續面存在。

綜合言之，本場址之地質條件並無重要地質構造、破碎帶與斷層存在，基盤岩層為桂竹林層，岩層位態大致為北 40 度東走向，向北傾斜 30 度，對場址而言亦無順向坡問題，且岩盤因未成岩，無顯著不連續面，地下水位甚深，這些因素均有利於邊坡的穩定，就地質條

件而言本貯存方式之建造並無負面之不利因素存在。由目前地表茂密的植生覆蓋顯示，邊坡長期處於穩定狀態。但因土壤具有高滲透性，低膠著力的特性，可預期邊坡抵抗沖刷的能力甚差；邊坡破壞的模式主要是沖刷或淺圓弧型滑動。

2.4 地震分析簡介

2.4.1 地震反應譜

欲了解結構物在地震時的反應行為，必須蒐集鄰近地區的地質及地震資料，並了解地震所引起地表運動特性。地表運動，其特性可藉強震記錄器所記錄到的地表加速度來加以描述，從地表加速度記錄中可得到一些重要的資料，如振幅、頻率、及延時等資料，而地表運動的強度可藉地震反應譜來顯示。

考慮一理想化單自由度結構物系統，受地表運動作用之情形，如圖 2.9 所示。其方程式可寫成：

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (2-1)$$

其中：

m ：物體的質量。

c ：系統阻尼。

k ：彈性模數。

\ddot{u} 、 \dot{u} 、 u ：分別表示相對加速度、相對速度和相對位移。

\ddot{u}_g 、 \dot{u}_g 、 u_g ：地表加速度和地表位移，又絕對位移為 $u_t = u + u_g$ 。

又自然頻率(natural frequency)為 ω

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-2)$$

阻尼比(damping ratio), ξ

$$\xi = \frac{c}{2m\omega} \quad (2-3)$$

所以(2-1)式可寫成

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g \quad (2-4)$$

假設此結構系統受地表運動作用時，其反應均在彈性範圍內，則(2-4)式之解可由杜式積分(Duhamel integral)求得：

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{u}_g \exp[-\xi\omega(t-\tau)] \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (2-5)$$

其中 $\omega_D = \omega\sqrt{1-\xi^2}$ ，假如阻尼比很小 (<0.2)，則 $\omega_D \doteq \omega$ ，因此(2-5)式可改寫成

$$u(t) = \frac{1}{\omega} W(t) \quad (2-6)$$

其中

$$W(t) = -\int_0^t \ddot{u}_g \exp[-\xi\omega(t-\tau)] \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (2-7)$$

通常系統之最大位移 $|u(t)|_{\max}$ ，以 S_d 來表示，並稱之為譜位移

(spectral displacement)。

$$S_d = |u(t)|_{\max} = \frac{1}{\omega} |W(t)|_{\max} \quad (2-8)$$

譜位移對系統自然頻率 ω ，或自然週期 T ，所繪的圖稱為位移反應譜 (displacement response spectrum)。當阻尼係數很小時，從(2-4)式可知

$$(\ddot{u} + \ddot{u}_g) \doteq \omega^2 u \quad (2-9)$$

則系統之最大絕對加速度， $|\ddot{u} + \ddot{u}_g|_{\max}$ ，可用頻譜加速度 (spectral acceleration)， S_a 來表示

$$S_a = |\ddot{u} + \ddot{u}_g|_{\max} = \omega^2 |u|_{\max} = \omega^2 S_d \quad (2-10)$$

頻譜加速度對系統自然頻率 ω ，或自然週期 T ，所繪的圖稱為加速度反應譜 (acceleration response spectrum)，核一廠的地震反應譜如圖 2.10。

另一重要參數， S_v ，稱為譜假速度 (spectral pseudo velocity)，其定義如下：

$$S_v = |W(t)|_{\max} = \omega S_d \quad (2-11)$$

當結構物達到最大位移時，其具有最大的應變能 $kS_d^2/2$ 而無動能，假設讓此應變能以動能的形式表示，即 $\frac{1}{2} m \dot{u}^2 = \frac{1}{2} k S_d^2$ ，則此時之相對

速度，及所定義的 S_v ，如下式所示

$$\dot{u} = \sqrt{\frac{m}{k}} S_d = \omega S_d = S_v \quad (2-12)$$

S_v 被稱為譜加速度，是因為其與系統真正的速度並無直接關係。

地震反應譜是針對某一地震外力而言，各不同自然週期及不同阻尼比之單自由度系統結構物，將顯現出不同之反應譜。

一般而言，對地震之反應有下列數種反應譜：

- (1) 相對位移反應譜(relative displacement response spectrum)
- (2) 相對速度反應譜(relative velocity response spectrum)
- (3) 絕對加速度反應譜(absolute acceleration response spectrum)
- (4) 譜假速度反應譜(pseudo velocity response spectrum)
- (5) 相對加速度反應譜(relative acceleration response spectrum)

在耐震設計上所用地震稱之為設計地震，此地震所引起的地表運動稱為設計地表運動。欲求得某地區設計地震的地表運動特性與其可能發生的機率，工程師須對該區的地震歷史及地質情況有所了解，通常設計地震的震度及其發生的可能性，可藉震源與建址之間的距離來訂定。然而設計地震的震度與建址之間的距離，無法直接表示結構物設計所要的設計地表運動。

為滿足設計的需求，許多方法已發展出來使得設計地表運動的最大加速度，及其他特性與設計地震發生關聯。假設設計地表運動中的重要參數，如最大加速度、最大速度和最大位移已知，我們可由這些參數訂定出設計反應譜或簡稱為設計譜。反應譜與設計譜主要差異在於前者是表示結構物在受一實際地震的反應，而後者是表示欲設計的

結構物之耐震程度。

訂定耐震設計反應譜首要考慮為該建址的土層狀況(是為堅實地盤,中等硬度土層或是軟弱地盤),須由土壤鑽探得知,由剪力模數與 N 值等判定。再搜集與該建址地盤狀況相類似之測站歷年所獲得之地震歷時記錄,選擇合理可用的且經過適當儀器的基線修正後,分別求出加速度反應譜,再經由統計求其平均加速度反應譜,及加上一倍標準偏差之反應譜,再分別將此二者平滑化即可。上述之地震歷時若不足或全無,則可考慮由已知之岩盤地震反應能量譜,產生岩盤地震歷時,再經由理論分析考慮建址之地盤狀況,產生人造地表地震歷時記錄(如 SHAKE91 程式),並可求得地盤顯著週期以為參考。

2.4.2 模態組合

在地震分析中,除了須取得建築物的自由地表地震反應譜,考量建築物基礎與土壤間的土壤-結構互制作用(此部份於本報告第 3 章介紹)外,並須求得建築物的自然頻率,將相對應的反應譜模態加以適當的組合。

使用反應譜法以計算結構物、系統或設備的地震反應時,將只有每個模態的最大值被保留,而會失去不同模態間的關係;但這些模態的最大反應值通常並非發生於同一時間,所以這些反應值必須使用某些方法及程序加以結合,以模擬系統的反應。

被認同的組合方法,係考量建築物在結構上被理想化的反應譜,縱座標為反應譜,橫座標為頻率的分布圖,如圖 2.11 所示。

通常在地震動態分析中,我們對於所欲分析的結構會做以下處理,以了解該結構在地震作用下的安全性:

(1)在一個反應譜動態分析中,把個別反應譜模態的值加以組合,

以尋求代表該特定反應譜的最大值。

- (2)在結構系統或組件所給予構件的反應譜動態分析中，結合歷時動態分析情況下的極大值或反應譜動態分析情況下的代表極大值，這樣的數值在地震分析的三個方向中被獨立計算時，該結合的值將是結合的反應譜的代表最大值；實際的意義係在於「地震所引起三個空間中，各個分量產生作用的結合」。

在獨立計算個別模態反應譜的極大值，以及結合它們以推估動力分析反應譜的極大值方法中，可分為在異相低頻率區域模態反應譜的 SRSS 法、Rosenblueth's 雙總和法(DSC)、Der Kiureghian 的完全二次結合法 (CQC)，過渡頻率區域區的 Lindley-Yow 法、Gupta 法以及高頻模態的質量遺失法、靜態 ZPA 法。

在地震三個空間分量作用的結合方面則可分為反應譜法及歷時分析法。

這些方法的目的是在於分析地震作用時，可求得具代表性的極大值，以了解結構是否安全或據以設定結構所需安全標準。

3. SSI 分析原理方法與過程說明

由於支撐建築物的土壤或岩盤會產生變形，基礎板所得的運動結果必然與在自由地表所得者不同，這個存在於基礎板運動與自由地表運動間的差異稱之為土壤-結構互制作用(soil-structure interaction, SSI)效果。本章主要在介紹土壤-結構作用的相關規範、原理及分析方法。

3.1 設計分析規範

土壤-結構互制作用的相關規範主要列於 NUREG-0800 3.7.2 [10] 節地震系統分析中，其中與本計劃相關的內容簡略敘述如下：

在 NUREG-0800 3.7.2 節[10]中，介紹在申請者的安全分析報告內應做審查的項目包括：地震分析方法、自然頻率及反應、分析模型的使用過程、土壤-結構互制作用、樓版反應譜的形成、三方向地震運動、模態反應之結合、非耐震一級與耐震一級建物間的交互影響、樓版反應譜的參數變化效應、等效垂直靜載重因子的使用、計算扭曲效應的方法、反應比較、阻尼分析過程、耐震一級建物翻覆力矩的決定、界面審查等，這些審查將選取有關部分做簡要說明。

(1) 地震分析方法

在耐震一級建物、系統或設備所使用的分析方法，諸如反應譜、單歷時記錄、多歷時記錄、等效靜載重等，均應審查。在動力分析方法上，模型基礎的扭曲、振動、位移，所選用的有效振態、集中質量數、自由度等，及地震所導致的支撐間最大相對位移，均應列入審查；如果以試驗或經驗法則取代分析，則試驗所用的方法、過程、載重層級及接受基準等均須審查。規範所列的方法一般均係在線性、彈性下

的分析，並且應力在建物的容許彈性限度內，但在特殊情況下，審查人員也接受有限度的非彈性、非線性的行為概念，但這些均應列入個案審查。

(2) 自然頻率及反應

在申請操作執照的審核中，耐震一級建物的重要自然頻率及反應是須列入審查的，此外，耐震一級設備及重要支撐點的反應譜也須經過審查。

(3) 土壤-結構互制作用

設計地震運動係定義在「自由地表」上，自由地表的意思是：在地表面上，在真實或假設的岩石露頭上，或者在對於特定場地適合的岩石界面上，沒有眼前建築物的存在。由於支撐的土壤或岩盤會產生變形，基礎板所得的運動結果必然與在自由地表所得者不同，這個存在於基礎板運動與自由地表運動間的差異稱之為土壤-結構互制作用效果。

當申請時，土壤-結構互制分析的控制運動定義、位置以及模擬的方法，用以分析系統耐震及其基礎均須審查。在考慮接受特殊模擬方法上的重要因素包括：(a) 基礎的範圍，(b) 土壤深度，和 (c) 土層分佈狀況。

所有土壤-結構互制作用分析者須體認到一些普遍存在的不確定性現象，包括：

- a. 輸入運動至現場的傳遞。
- b. 自然土壤、岩石分佈及其材料特性的散漫。
- c. 土壤本質模擬的不準度。
- d. 非線性的土壤行為。

- e. 結構與土壤間的連結。
- f. 土壤堆積缺乏對稱性，但通常假設為對稱。
- g. 在結構反應上的孔隙水效應，包括隨時間而變化的地下水位效應。
- h. 在地震其間結構物與土壤的部分分離或失去接觸所產生的影響。

土壤應變相依特性（如阻尼、剪力模數、孔隙水壓等）、土層分佈、土壤性質變化等，在分析中的過程須審查。

決定模型中基礎邊界及側面邊界的基準應加以審查；在土壤-結構互制分析中，若有考量鄰接建物對結構物反應的影響，則其過程應加以審查。

在土壤-結構互制的動力分析過程中，可能須導入適當定義的震動或力量函數，作用在模型邊緣，以模擬地震作用；產生這樣一個函數系統的過程及原理須審查。

（4）樓版反應譜的形成

樓版反應譜的形成須審查。形成樓版反應譜的方法有許多，一類是以一個或多個地表歷時記錄做歷時分析以形成設計反應譜，另一類是用一些分析技巧，通常被稱為直接解答的方法以形成反應譜，不論何種方法，這些方法的驗證及理論基礎都應審查。

（5）三方向地震運動

在決定結構物、系統或設備的地震反應中，如何考慮地震三方向的運動將列入審查。

（6）模態反應之結合

當使用反應譜法以計算結構物、系統或設備的地震反應時，將會失去不同模態間的關係，只有每個模態的最大值被保留，但這些模態的最大反應值通常不是發生在同一時間，這些反應值必須使用某些程序加以結合，以近似或契合系統反應，所以當使用反應譜法時，這些模態反應值的結合將須審查。

3.2 分析原理及方法

為進行土壤-結構互制作用分析，須考量土壤動力特性以及土壤與結構間的互制之作用；前者採用 SHAKE 91 程式，將自由地表 (free-field) 反應譜等效線性化後，再將輸出結果交由 SASSI 進行土壤與結構間的互制作用分析，本節分別對其程式本身、相關原理及方法做簡單之介紹。

3.2.1 SHAKE 91 等效線性化

由於地震載重情況下土壤的反應係屬非線性反應，故地震作用下土壤-結構互制作用分析的第一步是決定等效線性的土壤及岩石動力特性，以及與現場事實相符的自由地表 (free-field) 反應譜，以便在 SSI 系統模型及反應譜分析中應用。

為達成此項目的，自由地表反應譜之分析，係利用一維等效線性現地土壤柱模型，及一維地震波傳遞分析電腦程式 SHAKE 91 做相關處理。為估計現場土壤岩石的不確定特性，美國 NUREG-0800 第 3.7.2 節要求考慮土壤岩石特性最佳估計 (best-estimate, $G_{B.E.}$)、下限值 (lower-bound, $G_{B.E.}/2.0$) 及上限值 (upper-bound, $G_{B.E.} \times 2.0$)，一般而言，這樣的範圍已足以涵蓋實際土壤岩石特性的變化了。

SHAKE 91 程式將土壤特性理想化為均質、具有粘彈性 (visco-elastic)，在水平方向無限延伸的多層狀構造體，其基底為半

無限空間之堅硬岩層。理想化土壤特性圖如圖 3.1，程式的主要架構如圖 3.2。

此系統的反應係根據垂直向傳遞的剪力波來計算，原始 SHAKE 程式的運算規則係基於波動方程式 (wave equation) 的連續解，該方程式適用於暫態運動 (transient motion)，使用 Cooley 與 Tukey 的快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT) 技巧。詳細的應用方程式推導過程及相關資料記錄於原始 SHAKE 使用手冊中。

在使用於推估土壤的非線性特性的一個等效線性化的過程中，係使用反覆重覆計算的方法，以求取在各土層所適用的等效平均應變模式中，相關的模數及阻尼。在一開始時，每層土壤的一組特性必須先加以設定，包括剪力模數、阻尼及總單位重等，使用這些特性將推導每一土層的剪力應變，於是每一土層的剪力模數及阻尼比將根據剪力應變與這兩種參數的關係加以修正。這樣的分析將一直重覆，直到容許應變模數 (strain-compatible modulus) 及阻尼值被求得。起始於每一土層的最大剪力模數及低阻尼，對於大多數土壤而言，經過 5~8 次的反覆計算即可求得誤差 1% 之內的容許應變特性。

在分析過程中並且包括了以下的假設：

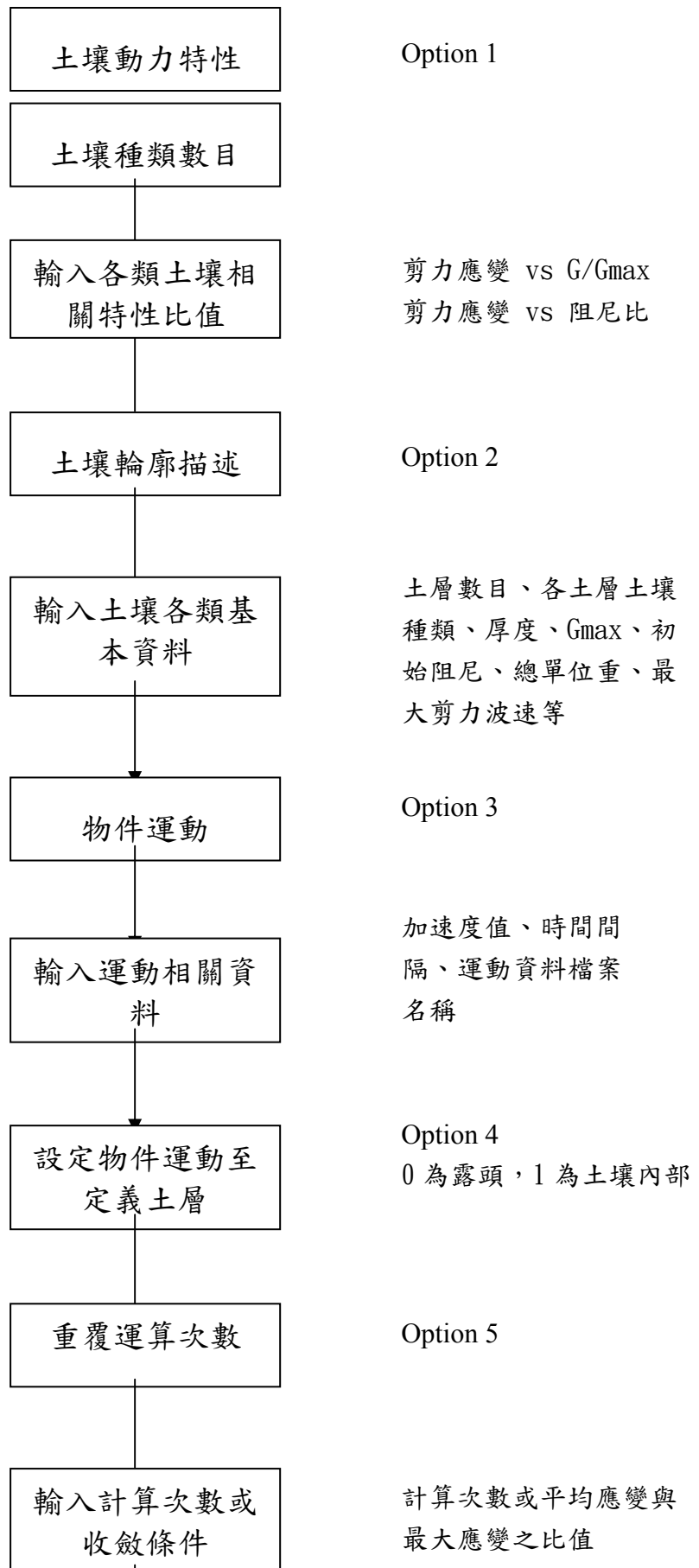
- (1) 每個土層 (代號 m)，是完全取決於它的剪力模數 G_m ，阻尼比 λ_m ，總單位重 γ_{tm} ，以及厚度 h_m ，這些特性與頻率無關。
- (2) 土壤土層的反應係導因於底下岩石層向上傳遞的剪力波。
- (3) 剪力波被定義於等時間間隔的加速度座標。
- (4) 應變有賴於每層土壤的剪力模數及阻尼，是基於該層土壤的等效平均應變模式下的等效線性化過程所求得的。此等效平均剪應變除以所求得的最大應變值之比值係由使用者所規範的收斂值，這數值將適用於所有土層。

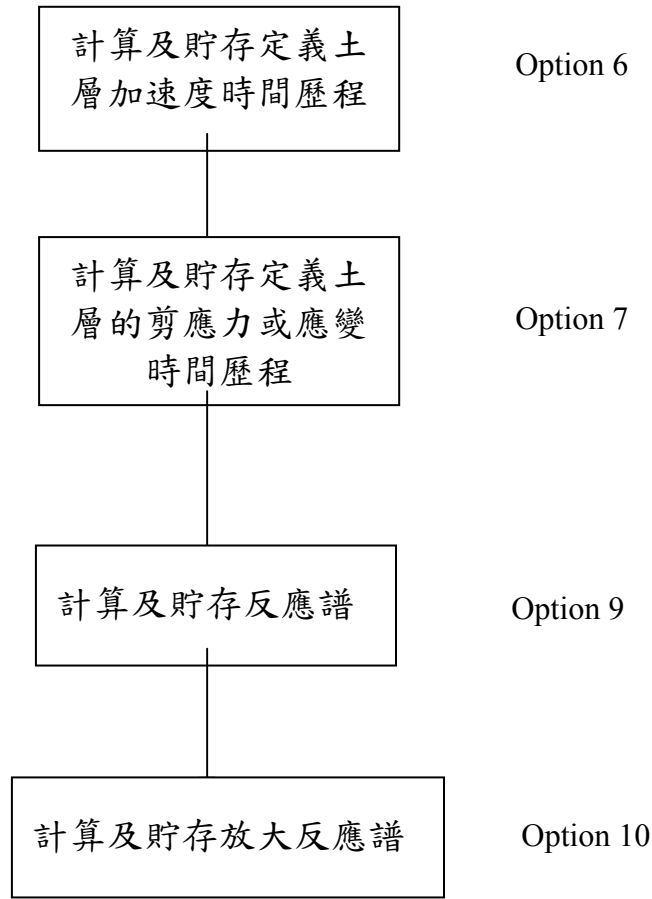
SHAKE 91 程式重新編號後的選項包括：

- 選項 1：土壤動力特性
- 選項 2：土壤概況描述資料
- 選項 3：輸入物件運動
- 選項 4：設定物件運動至定義的土層頂端或相關的露頭
- 選項 5：重覆計算次數或平均應變對最大應變的比值
- 選項 6：計算及貯存定義土層頂端的最大加速度及時間歷程
- 選項 7：計算及貯存定義土層的剪應力或應變時間歷程
- 選項 8：物件運動的時間歷程
- 選項 9：反應譜（response spectrum）
- 選項 10：放大反應譜（amplification spectrum）
- 選項 11：傅立葉放大效應（Fourier amplitudes）

SHAKE 91 運用低應變土壤岩石特性，諸如垂直向剪力波速、土壤單位重、剪力模數-有效剪應變以及阻尼比-有效剪應變曲線等資料，經由程式分析現地自由地表反應譜，可得出兩個水平方向及垂直方向的地震歷時記錄。

SHAKE 91 係將輸入資料寫成檔案，由程式讀入後執行，與 FORTRAN 程式的使用方法類似；需輸入的檔案包括土壤特性資料及地震反應譜資料兩個檔案，以下的分析流程係指建立特性資料檔案時，輸入的先後次序及流程如下：





以上流程中並未列入選項 8，因該選項乃計算物體運動歷時記錄，此項雖未刪除，但相關計算在選項 6 中設定更容易，故原使用手冊中不建議使用，未多加說明。

3.2.2 SASSI 土壤-結構互制分析

為推估地震反應譜對於三維土壤結構互制反應的效果，可運用三維有限元素法，SSI 的電腦分析程式 SASSI，以等效線性化 SSI 的分析。SASSI 是一個線彈性有限元素電腦分析程式，具有處理建築物基礎的結構，部分或全部地埋入水平地層中，具有磁滯阻尼現象的彈性土壤/岩石半無限空間媒介物之能力。因為該程式屬於線性分析程式，它並不能直接處理應變相依的土壤特性，但它可直接以一種反覆的、

等效線性化的方法加以處理。

SASSI 分析程式所採用的基本原理，係基於被稱為柔性體積法 (Flexible-Volumem Method) 的多步驟基礎結構法，在頻率域內加以系統化。考量 SSI 系統為有限元素模型，並將土壤理想化為由複雜材料組合而成，並伴隨著為自由地表土壤/岩石半空間介質所推導，由動態格林 (Green) 函數 (註：施加變動頻率的單位簡諧點荷重所得動態位移結果) 轉換而來的自由地表土壤阻抗 (soil impedance) 函數 (註：以力-位移關係做為頻率的函數)，SSI 系統的運動主控方程式之解可用頻率-反應 (frequency-response) 法在頻率域中求得，在頻域中以複數頻率-反應形式出現的解，可用知名的快速傅立葉轉換法，經傅立葉轉換，轉換成在時間域中所需的動力反應歷時記錄，則藉由歷時記錄，可得知施加於建築物的真正作用力。

材料模數，包括彈性模數及穩定磁滯現象阻尼比 (constant-hysteresis damping ratio)，以複數形式來表示如下式：

$$G^* = G(1 - 2\beta_s^2 + 2i\beta_s\sqrt{1 - \beta_s^2}) \quad (3-1)$$

$$E_p^* = E_p(1 - \beta_p^2 + 2i\beta_p\sqrt{1 - \beta_p^2}) \quad (3-2)$$

其中 $i = \sqrt{-1}$ ， β_s 、 β_p 為伴隨剪力波速及壓力波速而來的穩定磁滯現象阻尼比，而實際剪力及彈性模數

$$G = \rho V_s^2 \quad (3-3)$$

$$E_p = \rho V_p^2 \quad (3-4)$$

其中：

ρ ：密度(density)。

V_s ：剪力波速。

V_p ：壓力波速。

在實際應用上，經常將 β_s 及 β_p 數值設定為相等，即 $\beta_s = \beta_p = \beta$ ，如此則柏松比(Poisson's ratio)將成為實數。

柔性體積次結構法的基本概念，如圖 3.3 所示，將整個結構及所在地現場土壤分為三個次系統(subsystem)：

- (1) 半無限空間自由地表土壤介質(不包含被開挖部分)。
- (2) 被開挖部分的土壤。
- (3) 上部結構及基礎結構(含回填土)。

在這三個次系統中，自由地表土壤介質動力特性，係由土壤的阻抗函數(impedance functions)所代表，該函數係由水平層狀、穩定磁滯現象阻尼比半無限空間的彈性介質特性而來；被開挖部分的土壤係由 3-D 實體有限元素所代表，具有”負”(negative)動力特性，含有複數材料模數；結構次系統部分，係由各種型態的 3-D 實體有限元素所代表，具有複數材料模數。

在自由地表土壤介質與被開挖土壤的動態交互作用(dynamic interaction)，發生於被開挖土壤體積的所有點上；而結構與被開挖土壤間的動態交互作用，發生於基礎與土壤介面邊緣的所有點上，該處正是基礎結構與開挖土壤外緣所接觸之點。

完整 SSI 系統的運動方程式，根據以上所描述，並導入自由地表地震運動，可在頻率域中分別建立以上所描述三個次系統的動力平衡

方程式，並運用疊加原理及容許變位情況將這些方程式結合，於是導出以下矩陣形態的完整 SSI 系統運動方程式，如下：

$$\begin{bmatrix} \underline{C}_{ss}(\omega) & \underline{C}_{si}(\omega) \\ \underline{C}_{is}(\omega) & [\underline{C}_{ii}(\omega) - \underline{C}_{ff}(\omega) + \underline{X}_{ff}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{U}_s(\omega) \\ \underline{U}_f(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \underline{X}_{ff}(\omega) \overline{\underline{U}}_f(\omega) \end{Bmatrix} \quad (3-5)$$

其中 ω 代表角頻率(circular frequency)，下標 s, i, f 分別代表結構次系統這些相關點的自由度(參見圖 3.3)，不包含在基礎/土壤介面的點；這些在基礎/土壤介面的點，以及被開挖土壤體積內的點，將被分開處理。矩陣 $\underline{C}(\omega)$ 是一個複數值的動力勁度矩陣，其定義如下

$$\underline{C}(\omega) = \underline{K}^* - \omega^2 \underline{M} \quad (3-6)$$

其中：

\underline{M} ：由各次系統而來的常數質量矩陣。

\underline{K}^* ：由各次系統而來的複數勁度矩陣。

該複數勁度矩陣 \underline{K}^* 是由帶有複數材料模數的標準有限元素勁度矩陣所形成的。另外， $\underline{U}_s(\omega)$ 及 $\underline{U}_f(\omega)$ 兩個向量分別代表複數值的總節點位移向量， $\underline{X}_{ff}(\omega)$ 代表複數值的土壤阻抗矩陣， $\overline{\underline{U}}_f(\omega)$ 是所輸入的自由地表地震運動總位移向量。

SASSI 程式在頻率域中求出方程式(3-5)的解，亦即求得 $\underline{U}_s(\omega)$ 及 $\underline{U}_f(\omega)$ 的頻率反應函數，則所須的總位移歷時記錄將可由複數頻率反應函數的反傅立葉轉換(inverse Fourier transfer)求得。

但在解方程式(3-5)之前，必須先定義土壤阻抗矩陣 $\underline{X}_{ff}(\omega)$ 及自由地表地震運動向量 $\overline{\underline{X}}_{ff}(\omega)$ 。SASSI 程式的分析步驟如下：

(1) 解決現地自由地表反應譜問題，以決定：

- (a) 軸對稱自由地表現地土壤柱模型的波動傳遞邊界阻抗，該邊界條件係計算動態格林函數(dynamic Green's function)符合矩陣(compliance matrix)所需。
- (b) 自由地表土壤介質的地震運動向量 $\bar{U}_f(\omega)$ ，係由(a)所描述的地震波而來。
- (2) 計算動態格林函數，由被開挖土壤的體積內，與交互作用有關聯的點，所有點的自由度計算而來。
- (3) 由頻率域至頻率域，反轉符合矩陣(compliance matrix)，以取得相對應的土壤阻抗矩陣 $X_{ff}(\omega)$ 。
- (4) 將自由地表地震運動向量 $\bar{U}_f(\omega)$ 乘以土壤阻抗矩陣 $X_{ff}(\omega)$ ，以形成動態載重向量。
- (5) 形成結構次系統及被開挖部分土壤次系統的動態勁度矩陣，並以方程式(3-5)的形態，聯立這些動態平衡方程式。

3.3 分析模型及過程描述

SSI 的實際分析過程及相關資料將在本節中加以簡單介紹，包括考量土壤動力特性，以 SHAKE 91 程式將自由地表反應譜等效線性化，並由 SASSI 進行土壤與結構間的互制作用分析。

3.3.1 等效線性化核一廠土壤動力特性

由於相關資料數量十分龐大，本報告僅以核一廠現地地質鑽探報告 C-9 鑽孔為例，說明 SHAKE 91 實際的分析過程。

相關的地質資料，包括鑽孔位置圖、鑽孔地質柱狀剖面圖、波速及動態模數資料等如圖 3.4~3.9 所示，根據這些資料，經單位轉換後整理出輸入檔所需的土壤特性，如下表 3-1：

以上資料中，其中初始阻尼係由實驗室經驗而來的估計值，另外最大剪力波速與最大剪力模數擇一輸入即可。

地震歷時記錄資料包括地震加速度值及時間間隔，本報告以核一廠的地震反應譜為根據，分別以 SIMQKE 及 STARDYNE 建立歷時記錄：

(1) 以 SIMQKE 建立的歷時記錄，最大加速度值為 0.3 g (註：g 為重力加速度)，時間間隔為 0.01 秒，共有 2000 筆資料，時間總計 20 秒；由於資料數量十分龐大，僅列出地震加速度歷時記錄如圖 3.10 以供參考。

(2) 以 STARDYNE 建立的歷時記錄，最大加速度值為 0.3 g (註：g 為重力加速度)，時間間隔為 0.005 秒，共有 2048 筆資料，時間總計約 10 秒；由於資料數量十分龐大，僅列出地震加速度歷時記錄如圖 3.11 以供參考。

在 SHAKE 91 執行時，給予相同路徑下的輸入資料檔案名稱 (注意：輸入資料檔案中，在選項 3，需給予運動資料檔案名稱，並須置於相同路徑下)，隨後依指示依序輸入兩個輸出檔案名稱，執行後即可得所指定名稱的兩個輸出檔案。

在輸入資料檔案中，關於土壤動力特性的部分，與範例採取的特性曲線相同，係採用 Sun et al, 1988 [18]、Idriss, 1990 [19]、Seed & Idriss 1970 [20]、Schnabel et al, 1972 [21] 等研究報告所得的特性曲線，曲線圖如圖 3.12。

程式中所用的模數折減與阻尼比對應於剪應變之關係曲線，於實際分析所輸入之資料繪製成關係曲線圖分別如圖 3.13 及 3.14 所示。

對於實際資料輸入運算後，所得的等效線性化結果，係顯示在兩

個輸出檔中，假設名稱分別為 Output1.txt 及 Output2.txt，其特性如下：

(1) Output1.txt 檔案內容包括整理及回應在輸入檔中所列的資料，與代入程式計算後所得的結果，包括最大剪應力、剪應變、最大加速度、回應反應譜、傅立葉反應譜以及放大反應譜等。

(2) Output2.txt 包括所有要求的歷時資料，如加速度、應力、應變等歷時資料。

Output1.txt，可讓使用者再次確認輸入資料的正確性，如列出地層資料及最先、最後 5 列的加速度資料，可避免資料的誤用或打字錯誤；若程式不能完全執行，也能了解在哪個部分出現問題，以利修正。

回應部分可計算出相關的地質、運動或應力應變資料，可做為設計之參考，也可作為程式本身繼續運算之資料來源。

Output2.txt，主要均為歷時資料，加速度資料筆數需為 2 的冪次方（如 1024,2048,4096...等），但因程式本身之限制，最大資料筆數設定為 4096，若超過則可能發生不可預期的錯誤。至於應力或應變之歷時資料，其資料筆數於選項 7 中設定，一般應設定與輸入的反應譜加速度資料筆數相同。

由於所得輸出檔案資料極為龐大，許多相關資料動輒以數千筆計，不便於報告中列出，為便於參考，也便於分析結果的判讀，於是將相關資料歸納為圖形，包括：

(1) 以 SIMQKE 建立的歷時記錄，經 SHAKE 91 分析後所得結果：

(a) 反應譜加速度圖如圖 3.15。

(b) 計算後加速度反應譜如圖 3.16。

(c) 計算後放大反應譜圖如圖 3.17。

(d) 位於地下 6.8 ft 剪應力歷時圖如圖 3.18。

(e)位於地下 6.8 ft 剪應變歷時圖如圖 3.19。

對於分析結果，初步判讀如下：

- (a)在圖 3.15 計算後加速度反應譜中可看出，經計算後，地表加速度值較原先加速度反應譜之值為大，但差異並非很大，顯然現場地質對於加速度值有些許的放大作用，該核一廠現地壓密程度並不差，這樣的放大係數應係合理範圍中。
- (b)在圖 3.17 中顯示，於頻率達 50 Hz 時，放大比例也逐漸收斂至 1，於最大頻率部分設定為 50 Hz 應屬合理。
- (c)圖 3.18、3.19 分別為第二層土壤頂部(位於地平面下 6.8 ft)剪應力及剪應變的歷時圖，所得結果與原程式所附的結果(原始最大反應譜加速度為 0.1g，於地下 20 ft 處)相較，應力部分最大值約為其 1/2，應變部分最大值約為其 1/4，結果應屬合理。

由以上結果的判讀，顯示線性化分析結果可用，對於使用的最大加速度較原有略大，也趨向保守，並應較原有加速度反應譜合理。

(2)以 STARDYNE 建立的歷時記錄，考量日後增添回填土層之狀況，並將原有土層再加以細分，總計將土層分為 10 層(含岩石層)，詳細輸入土層資料如附錄 1 輸入檔案中之 Option 2，並經 SHAKE 91 分析後所得結果：

- (a)反應譜加速度圖如圖 3.20。
- (b)計算後加速度反應譜如圖 3.21。

- (c)計算後放大反應譜圖如圖 3.22。
- (d)位於地下 7.96 ft 剪應力歷時圖如圖 3.23。
- (e)位於地下 7.96 ft 剪應變歷時圖如圖 3.24。

對於分析結果，初步判讀如下：

- (a)在圖 3.21 計算後加速度反應譜中可看出，經計算後，地表加速度值較原先加速度反應譜之值為大，此結果與先前由 SIMQKE 所建立分析所得比較下，最大加速度值較之前略大，但十分接近，顯然這樣的結果相當合理，並偏向保守，應屬可信。
- (b)圖 3.23、3.24 分別為第三層土壤頂部(位於地平面下 6.8 ft)剪應力及剪應變的歷時圖，所得結果與原程式所附的結果(原始最大反應譜加速度為 0.1g，於地下 20 ft 處)相較，應力部分最大值約為其 3/4，應變部分最大值約為其 3/4，結果應屬合理。

3.3.2 土壤-結構互制分析

以 SASSI 處理土壤-結構互制分析，首先先建立各部分次系統的模型，其次再將 SHAKE 91 線性化分析所得資料輸入程式中，由於由 STARDYNE 所規劃出之資料較為保守，並且增加回填土層的設定也與未來情況較為相符，故採用此分析結果輸入 SASSI 中分析，詳細分析資料請參見附錄 2。

總而言之，SSI 的分析將基於現場的地質鑽探資料(參考台電委託益鼎工程股份有限公司所做的地質鑽探調查報告)，選取適當的位置及數量，以電腦分析程式 SHAKE 91 將所得土壤岩石特性加以分析，並等效線性化後，得出適當等效資料。而後建立適當的板塊地下基礎模

型，版塊基礎應是對稱結構，由於樁基礎所需經費龐大，因此估計應是使用筏式基礎，可兼顧經濟及避免不均勻沉陷的產生，本報告以此假設為準作相關分析。考量在板塊基礎相對應的方向及深度，選取適當的地震反應譜，使用 SSASI 電腦程式，分析地震作用下的土壤-結構互制效應。

4.HI-STORM 100 貯存設施滑動和翻覆分析

Holtec 用過核子燃料中期貯存設施採直立方式放置於貯存場所，在貯放期間若因外力(如風力或地震)作用而使貯存設施發生傾倒，不但會傷及貯存設施本身，對於內部的用過核子燃料亦會造成損傷。若因傾倒導致護箱破損而造成洩漏，對社會大眾及操作人員將造成重大威脅。

HI-STORM 100[®]貯存設施為直立式圓柱狀結構物，尺寸大小為 $\phi 3.37 \times 6.08$ m H ($\phi 132.5'' \times 239.5''$ H)，總重量為 161 噸(354,431 lbs)，如圖 4.1 及圖 4.2 所示；HI-STORM 貯存設施詳細的尺寸及重量等設計參數如表 4.1 所示。為了防止貯存設施於貯放期間因外力作用而發生滑動和翻覆，必須加以分析，以確保貯存設施的安全。

4.1 LS-DYNA 分析

為了評估 HI-STORM 100[®]貯存設施的穩定性，本章將利用 ANSYS/LS-DYNA[®]進行貯存設施的滑動和翻覆分析。LS-DYNA[®]為一非線性動力分析軟體，目前已廣泛地應用至舉凡汽車碰撞(car crash)、深引伸(deep drawing)、超塑成形(superplastic forming)、滾軋(rolling)、擠製(extrusion)、掉落試驗(drop test)、碰撞穿孔破壞(penetrative failure)、大變形(large deformation)以及山坡土石流等眾多動力問題的分析，具有相當不錯的分析結果及分析性能，廣為工業界所採用。

LS-DYNA[®]使用顯式方法(explicit method)來進行計算，有別於傳統力學計算的隱式法(implicit method)。在顯式方法裡，物體加速度可以表示為下式：

$$\{a_t\} = [M]^{-1}(\{F_t^{ext}\} - \{F_t^{int}\}) \quad (4.1)$$

其中：

$[M]$ ：物體的質量矩陣。

$\{F_t^{ext}\}$ ：施加於物體上的外力(external force)向量和物體本身的體力(body force)向量。

$\{F_t^{int}\}$ ：內力(internal force)向量。

(4.1)式中的下標 t 係指時間。物體在外力作用下，其速度、位移和位置可由下列方程式計算求得：

$$\{v_{t+\Delta t/2}\} = \{v_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\}\Delta t_t \quad (4.2)$$

$$\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \{v_{t+\Delta t/2}\}\Delta t_{t+\Delta t/2} \quad (4.3)$$

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_o\} + \{u_{t+\Delta t}\} \quad (4.4)$$

其中時間增量 $\Delta t_{t+\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t})$ ， $\Delta t_{t-\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t - \Delta t_{t+\Delta t})$ 。(4.4)式中 $\{x_o\}$ 為物體的初始位置。

利用顯式方法進行數值計算時，為了得到穩定的解，時間增量大小必須小於臨界時間增量 Δt^{crit} ，定義如下：

$$\Delta t \leq \Delta t^{crit} = 2 / \omega_{max} \quad (4.5)$$

在(4.5)式中， ω_{max} 為最大自然圓頻率(maximum natural circular frequency)，或稱最大自然頻率。對於長度為 L 的樑元素，其最大自然頻率為 $\omega_{max} = 2c/L$ ，其中 c 為波傳速度(wave propagation velocity)，如下式所示：

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (4.6)$$

上式中， E 為材料楊氏係數(Young's modulus)， ρ 為密度(density)。

對於板殼元素，特徵長度(characteristic length) L 和波傳速度 c 定義如下：

$$\text{四角形板殼元素： } L = \frac{A}{\max(L_1, L_2, L_3, L_4)} \quad (4.7a)$$

$$\text{三角形板殼元素： } L = \frac{A}{\max(L_1, L_2, L_3)} \quad (4.7b)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (4.8)$$

(4.7a)式及(4.7b)中的 A 為板殼元素的面積，而 L_1 ， L_2 ， L_3 ，和 L_4 為板殼元素每邊的邊長。(4.8)式中的 ν 為蒲松比(Poisson's ratio)。

4.2 滑動和翻覆動力分析

貯存設施在地震作用下，有可能發生滑動，甚者發生翻覆，因而造成危險。圖 4.3 為核一廠用過核子燃料貯存場的正規化水平地表加速度歷時圖，有效作用時間為 10~20 秒。由圖 4.3 (a)可知，地震在 $t = 10$ 秒以後，其地表加速度逐漸衰減至零，由於很小的地表加速度值對自由站立物體的滑動和翻覆並不會造成影響，故在進行地震分析時，取前 10 秒的地表加速度值即可，如圖 4.3 (b)所示。

因貯存設施的滑動和翻覆和貯存場場址特性及安裝條件有關，本文為使分析結果可廣泛地適用於任何中期貯存設施貯存場及貯存環境，於此分別考慮地震強度為 0.3 g、0.5 g、0.8 g 及 1.0 g 的情形，而貯存設施與安裝水泥基座(concrete pad)間的摩擦係數則分別考慮為 0.2、0.4 及 0.6 等三種情形。在各種條件組合下，利用 LS-DYNA 進行動力分析，檢視貯存設施在各種條件下的滑動及翻覆情形。

本文在進行動力分析時，為了簡便，將圖 4.3(b)的地震歷時圖等比例縮放至所需的地震強度，以模擬不同強度下的地震歷時記錄。

4.3 HI-STORM 100 動力分析模型描述

由圖 4.1 及圖 4.2 可知，由於 HI-STORM 100 貯存設施結構紮實，且重量左右幾乎對稱，在滑動及翻覆分析時，因著重於貯存設施整體的運動表現，故可將貯存設施視為一密度均勻的實心圓柱。另外，為了保守及設計方便的原因，貯存設施的設計重量設定為 163293 kg (360,000 lbs)，以使分析結果可含蓋大部份的設計情形。

地震主要藉由土層傳至水泥基座，進而對其上的貯存設施造成影響，利用 ANSYS 所建立的貯存設施有限元素分析模型如圖 4.4 所示，其中 HI-STORM 100 貯存設施以 SOLID 164 建立，水泥基座則以 SHELL163 單一元素模擬；由於圖 4.3 的地震歷時記錄為考慮土壤-結構互制後的反應譜，在此可忽略土壤吸收震動動能的效應，故土壤並不予以模擬，此可大量節省分析計算的時間。

貯存設施與水泥基座間的接觸條件設定為點對面(Node To Surface, NTS)，貯存設施為接觸面(contact surface)，而地表為目標面(target surface)。為了簡化計算，貯存設施與水泥基座間的動摩擦係數及靜摩擦係數設成一致。

在動力分析時，經過土壤-結構互制後的地震反應譜直接作用於水泥基座上，作用方向及大小在水平方向(X、Y)分別為一倍的地震強度，而垂直方向(Z)則為三分之二倍的地震強度。因重力關係，貯存設施須施加一向下的重力加速度， $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$ 。

在正常營運狀態下，貯存設施底座和水泥基座間為面接觸，貯存設施的自重均勻地由底座承受。在地震作用下，貯存設施和水泥基座

兩者會產生相對運動，此時，兩者除了一般的面接觸外，亦有可能造成點接觸或線接觸的情形，貯存設施巨大的重量壓擠水泥基座會造成壓擠處水泥的局部崩塌及破壞，形成絞支點，對貯存設施的運動造成影響。在分析時，為了簡化計算，並不考慮此種問題。

4.4 分析結果與討論

貯存設施在不同地震強度(0.3 g、0.5 g、0.8 g 及 1.0 g)和不同摩擦係數(0.2、0.4 及 0.6)作用下的分析結果分別如圖 4.6 至圖 4.17 所示，表 4.2 至表 4.13 為貯存設施和水泥基座在地震作用期間的運動歷時記錄。在地震作用下，貯存設施及水泥基座均會產生運動位移，此時，貯存設施的滑動距離定義為貯存設施和水泥基座兩者間的相對位移。

由分析結果可知，在地震作用期間，貯存設施會發生左右滑移和前後搖晃的現象，由圖 4.6(c)、(d)至圖 4.13(c)、(d)可知，最大滑動距離和最大搖晃角度並非發生在地震作用終了時，而是發生在地震作用期間。於此，貯存設施的最大滑動距離和最大搖晃角度設定為左右滑移和前後搖晃量絕對值的最大值。在不同地震強度及摩擦係數等條件下，貯存設施的最大滑動距離和最大搖晃角度分別如圖 4.18、圖 4.19 及表 4.14 所示。

由表 4.14 的分析結果可知，在摩擦係數固定的條件下，當地震強度愈大時，貯存設施所產生的滑動距離愈大，同時搖晃角度也會愈大，究其原因為較大的地震會使貯存設施產生較大的動能，使得克服地表摩擦阻力的能力增大，因而產生較大的滑動距離；較大的動能亦會使得貯存設施產生較大的前後搖晃角度。另外，在地震強度固定的條件下，摩擦係數愈大會使得搖晃角度愈大，反之，滑動距離則會愈小，此現象亦可由動能和摩擦阻力的觀念加以理解。

由分析結果可知，貯存設施在不同強度的地震作用下，只會在水方向產生不同程度的滑動而已，並不會發生翻覆。由表 4.14 可知，貯存設施在強度 1 g 設計地震及摩擦係數 0.2 的條件下，擁有最大的滑動距離，為 378 mm。

由 HOLTEC 的最終安全分析報告(FSAR) [1]可知，HI-STORM 100 貯存設施於營運時為了安全，採用 2×N 或 N×N 的方式排列，如圖 4.5(a)、4.5(b)所示。當貯存設施採用 2×N 方式排列時，貯存設施間的安裝距離為 $P_1 = P_2 = 4114.8 \text{ mm}$ ， $P_3 = 11582 \text{ mm}$ ($P_1 = P_2 = 13.5'$ ， $P_3 = 38'$)；若採 N×N 方式排列時，貯存設施間的安裝距離為 $P = 5689.6 \text{ mm}$ ($P = 18'-8"$)。2×N 及 N×N 貯存方式的選擇依貯存場地特性及經濟考量而定。於設計時，為了保守起見，貯存設施因地震所產生的滑動應考慮為反相(out-of-phase)滑動，因此，貯存設施的容許滑動距離分別為 2058 mm (2×N 排列)以及 2845 mm (N×N 排列)。由表 4.14 的分析結果可知，貯存設施的最大的滑動距離為 378 mm (在 $a_h = 1 \text{ g}$ ， $\mu = 0.2$ 時)，此值小於容許滑動距離，故貯存設施在地震作用下，彼此之間並不會有發生碰撞的情形。

4.5 結論

本章主要考慮在地震作用下，對自由站立的 HI-STORM 100 貯存設施進行穩定性評估，分析工具使用 LS-DYNA。本文為使分析結果可廣泛地適用於任何中期貯存設施貯存場及貯存環境，於此，地震強度考慮有 0.3 g、0.5 g、0.8 g 及 1.0 g 等四種情形，而貯存設施與安裝水泥基座間的摩擦係數則考慮有 0.2、0.4 及 0.6 等三種情形。在各種條件組合下，利用 LS-DYNA 進行動力分析，分別求解貯存設施在地震作用下的動態行為，經由分析，可得到下列的結論：

(1)在摩擦係數固定的條件下，當地震強度愈大時，貯存設施所產生的滑動距離愈大，同時搖晃角度也會愈大，究其原因為較大的地震會使貯存設施產生較大的動能，使得克服地表摩擦阻力的能力增大，因而產生較大的滑動距離；較大的動能亦會使得貯存設施產生較大的前後搖晃角度。另外，在地震強度固定的條件下，地表摩擦係數愈大會使得搖晃角度愈大，反之，滑動距離則會愈小，此現象可由動能和摩擦阻力的觀念加以理解。

(2)由分析結果可知，貯存設施在不同強度的地震作用下，只會在水平方向產生不同程度的滑動而已，並不會發生翻覆。由表 4.14 可知，貯存設施在強度 1 g 設計地震及摩擦係數 0.2 的條件下，擁有最大的滑動距離，為 378 mm。因此滑動距離小於貯存設施的容許滑動距離 2058 mm (2×N 排列)以及 2845 mm (N×N 排列)，故貯存設施在地震作用下，彼此之間並不會發生碰撞。

(3)經由分析可知，雖然 HI-STORM 100 貯存設施在地震作用下並不會產生翻覆，但因會產生滑動，為了顧及貯存設施的安全，貯存設施與水泥基座間應以合適的方式予以固定，以免發生危險。

5. NUHOMS[®]和 HOLTEC 貯存設施穩定性分析

NUHOMS[®]和 HOLTEC 分屬不同型式的用過核子燃料中期貯存設施，NUHOMS[®]為長方體型，而 HOLTEC 則為圓柱型。NUHOMS[®]標準化用過核子燃料中期貯存設施主要的組件包含有乾式乾式屏蔽罐(Dry Shielded Canister, DSC)、水平貯存模組(Horizontal Storage Module, HSM)、運送罐(Transfer Cask, TC)、傳送設施(Transport System)、...等，NUHOMS[®]標準化貯存設施各重要組件分別如圖 5.1 至圖 5.4 所示，而水平貯存模組的斷面尺寸如圖 5.5 所示。貯放 BWR 燃料的貯存設施其長×寬×高為 6 m × 2.9 m × 4.6 m (238 in × 116 in × 180 in)。為了防禦投射物的襲擊，NUHOMS[®]貯存設施在水平貯存模組兩側裝設有一 24 in 厚的端屏蔽牆(end shielding wall)，且後方亦裝設有一 24 in 厚的後屏蔽牆(rear shielding wall)予以保護，以預防因飛彈或投射物撞擊貯存設施所造成的危害。

HI-STORM 100 貯存設施主要包括三部份：(1)可替換的多用途容器(Multi-Purpose Canister, MPC)，(2)貯藏用外包裝貯存護箱(Holtec International Storage and Transfer Operation Reinforced Module, HI-STORM)，和(3)運送用包裝貯存護箱(Hi-TRAC)。HI-STORM 100 貯存設施其尺寸大小為 ϕ 3.37 m × 6.08 m H (ϕ 132.5" × 239.5" H)。

貯存設施在受到假設性意外事故如地震作用下，是否會造成滑動及翻覆是一項值得關心的議題，於設計時應加以考慮並予以防止，以避免不必要的危險發生。本章對於自由站立物體滑動和翻覆穩定性的分析，有別於第四章採用動力分析的方式，本章將以簡單的力平衡觀念建立滑動和翻覆的判斷準則，同時在假設貯存設施與安裝基座間未有任何錨定(anchor)的條件下，分別就 NUHOMS[®]和 HOLTEC 等兩種不同的貯存設

施進行滑動和翻覆穩定性的比較，以作為貯存設施選用時的參考。

5.1 滑動和翻覆條件

由於自由站立物體於地震作用下的滑動及翻覆和物體高度、物體底座型式、地震強弱以及摩擦係數等因素有關，故均必須加以考慮，求解物體於何種條件下會產生滑動？又於何種條件下會產生翻覆？以作為判斷物體滑動和翻覆的準則。本節以自由站立物體單獨承受水平方向地震及同時承受水平及垂直方向地震作用等兩種情形下，建立滑動和翻覆的判斷準則，敘述如下：

(1) 水平地表加速度

首先考慮只有水平地表加速度作用於物體的情形。對一高 h 寬 b ，且自由站立於地表上的長方體物體，在水平地表加速度作用下，如圖 5.6 右側所示。此時，物體因正向力所造成的摩擦阻力為：

$$f = mg\mu \quad (5.1)$$

上式中 m 為物體的質量； g 為重力加速度； μ 為摩擦係數。當地震作用時，地表會產生一水平加速度 a_h ，在運動瞬間，可視為地表不動，而物體受到一反向水平加速度的作用，此時物體所承受的等效推力為：

$$F = ma_h \quad (5.2)$$

若推力大於摩擦阻力，則物體會產生滑動現象，故由(5.1)式及(5.2)式可得滑動條件為：

$$a_h > \mu g \quad (5.3)$$

由上式可知，物體是否會產生滑動和該物體本身的質量無關，而和所承受的地表水平加速度有關，當地震所造成的地表水平加速度大於物體和地面間的摩擦係數時，則物體會產生滑動現象。

物體在地震作用下，若不滑動而在定點發生翻轉，如圖 5.6 所示，當物體對 A 點施轉之際，慣性力對物體所造成的翻覆力矩(overturning moment)為：

$$M_o = ma_h h / 2 \quad (5.4)$$

因物體自重對 A 點所產生的穩定力矩(stabilizing moment)為：

$$M_s = mgb / 2 \quad (5.5)$$

當翻覆力矩大於穩定力矩時，物體會產生翻覆現象，故由(5.4)式及(5.5)式可得翻覆條件為：

$$a_h > g(b/h) \quad (5.6)$$

由(5.6)式可知，物體寬高比(b/h)愈小，愈易造成翻覆，亦即高度愈高、亦或基座尺寸愈小的物體愈易造成翻覆。

動力分析

上述有關翻覆的問題可以使用動力方式求解，如圖 5.6 所示。當物體對 A 點產生旋轉之際，質心會有一旋轉角加速度 α ，以及水平加速度 a_x

及垂直加速度 a_y ，由力平衡可知：

$$X : f - ma_h = -ma_x \quad (5.7a)$$

$$Y : -mg + N = ma_y \quad (5.7b)$$

$$A : ma_h(h/2) - mg(b/2) = ma_x(h/2) + ma_y(b/2) + I_G\alpha \quad (5.7c)$$

上述方程式中， f 為摩擦力； N 為正向力；質心慣性矩

$I_G = (1/12)m(b^2 + h^2)$ ，水平及垂直加速度分別為 $a_x = (h/2)\alpha$ 、 $a_y = (b/2)\alpha$ 。

聯立(5.7a)、(5.7b)、(5.7c)三式，可求解三個未知數 N 、 f 和 α ，如下所示：

$$N = \frac{m}{4} \frac{(gb^2 + 4gh^2 + 3a_hbh)}{(b^2 + h^2)} \quad (5.8a)$$

$$f = \frac{m}{4} \frac{(4a_hb^2 + a_hh^2 + 3a_hbh)}{(b^2 + h^2)} \quad (5.8b)$$

$$\alpha = -\frac{3}{2} \frac{(-a_hh + gb)}{(b^2 + h^2)} \quad (5.8c)$$

當 $\alpha > 0$ 時物體會產生旋轉，故物體發生翻覆的條件可由(5.8c)式推得為：

$$a_h > g(b/h) \quad (5.9)$$

此理論分析結果同(5.6)式。

(2) 水平和垂直地表加速度

考慮如圖 5.7 左側的物體，同時受到水平及垂直地表加速度的作

用，為了配合地震的計算，其中垂直加速度 a_v 設定為水平加速度 a_h 的三分之二倍。物體因正向力所造成的摩擦阻力為：

$$f = m(g - 2a_h/3)\mu \quad (5.10)$$

地表加速度對物體所產生的等效推力為：

$$F = ma_h \quad (5.11)$$

若推力大於摩擦阻力，則物體會產生滑動現象，故由(5.10)式及(5.11)式可得滑動條件為：

$$a_h > \mu(g - 2a_h/3) \quad (5.12)$$

若物體不產生滑動，而相對於 A 點產生旋轉，則慣性力對物體所造成的翻覆力矩為：

$$M_o = ma_h(h/2) + m(2a_h/3)(b/2) \quad (5.13)$$

另外，因物體自重對 A 點所產生的穩定力矩為：

$$M_s = mgb/2 \quad (5.14)$$

當翻覆力矩大於穩定力矩時，物體會產生翻覆現象，故由(5.13)式及(5.14)式可得翻覆條件為：

$$a_h > \frac{3gb}{(3h+2b)} \quad (5.15)$$

動力分析

同理，上述問題亦可以使用動力方式加以分析，考慮如圖 5.6 的物體，當物體對 A 點產生旋轉之際，由力平衡可知：

$$X : f - ma_h = -ma_x \quad (5.16a)$$

$$Y : -mg + N = ma_y + m(2a_h/3) \quad (5.16b)$$

$$A : ma_h \left(\frac{h}{2} \right) - mg \left(\frac{b}{2} \right) + m \left(\frac{2}{3} a_h \right) \frac{b}{2} = ma_x \left(\frac{h}{2} \right) + ma_y \left(\frac{b}{2} \right) + I_G \alpha \quad (5.16c)$$

聯立(5.16a)、(5.16b)、(5.16c)三式，可求解三個未知數 N 、 f 和 α ，如下所示：

$$N = \frac{m (3gb^2 + 12gh^2 + 9a_hbh + 14a_hb^2 + 8a_hh^2)}{12(b^2 + h^2)} \quad (5.17a)$$

$$f = \frac{m (4a_hb^2 + a_hh^2 + 3gbh - 2a_hbh)}{4(b^2 + h^2)} \quad (5.17b)$$

$$\alpha = -\frac{1 (-3a_hh + 3gb - 2a_hb)}{2(b^2 + h^2)} \quad (5.17c)$$

當 $\alpha > 0$ 時物體會產生旋轉，故物體發生翻覆的條件可由(5.17c)式推得為：

$$a_h > \frac{3gb}{(3h+2b)} \quad (5.18)$$

此理論分析結果同(5.15)式。

由(5.3)、(5.6)、(5.12)及(5.15)式的比較可知，物體在同時承受水平及垂直地表加速度的作用下，較只承受水平地表加速度作用下來得容易產生滑動及翻覆，主要原因為垂直地震會讓物體的穩定性降低，較易產生滑動及翻覆。

對於 NUHOMS[®]和 HOLTEC 貯存設施的穩定性比較，將利用本節所建立的滑動和翻覆準則進行計算。為了統一且方便進行比較，於此，水平地震加速度將設定為 0.3 g，而垂直地震加速度設定為水平地震加速度的三分之二倍；另外，地表摩擦係數設定為 0.6。詳細的分析內容將於下節敘述。

5.2 NUHOMS[®]貯存設施滑動和翻覆分析

(1) 滑動分析

當自由站立的 NUHOMS[®]貯存設施受到地震作用時，垂直向上的地震作用力會使得 NUHOMS[®]貯存設施作用於地板上的重量減輕，減少其抵抗滑動的力量，使得抵抗滑動的力量變為：

$$F_{sl} = (M_{HD} + 2M_e + M_r)(g - a_v) \cdot \mu \quad (5.19)$$

其中：

a_v ：垂直地震加速度， $a_v = 0.2 g$ 。

g ：重力加速度。

M_{HD} ：NUHOMS[®]貯存設施的質量(不包含地板的質量)， $M_{HD} = 146963.93 \text{ kg}$ 。

M_e ：端屏蔽牆的質量， $M_e = 40505.80 \text{ kg}$ 。

M_r ：後屏蔽牆的質量， $M_r = 29937.10 \text{ kg}$ 。

μ ：摩擦係數， $\mu = 0.6$ 。

經由計算，可得滑動摩擦阻力 $F_{sl} = 1.21 \text{ MN}$ 。

而水平地震負荷會使得 NUHOMS[®] 貯存設施具有滑動的傾向，所產生的水平橫向力為：

$$F_{hs} = (M_{HD} + 2M_e + M_r)a_h \quad (5.20)$$

上式中 a_h 為水平地震加速度， $a_h = 0.3 \text{ g}$ ； M_{HD} 、 M_e 及 M_r 的定義同前。經由計算，可得 $F_{hs} = 0.76 \text{ MN}$ 。此水平橫向力小於移動 NUHOMS[®] 貯存設施所需最小力量 F_{sl} ，故 NUHOMS[®] 貯存設施不會因地震負荷作用而產生滑動。防止滑動的安全因數為 1.6。

由(5.12)式可知，當水平地表加速度大於 0.429 g 時，NUHOMS[®] 貯存系統會產生滑動。

(2) 翻覆分析

考慮自由站立且兩側具有端屏蔽牆及後側具有後屏蔽牆的 NUHOMS[®] 貯存設施，於圖 5.8 (a) 中對 A 點及圖 5.8 (b) 中 B 點分別取力矩，若地震對貯存設施作用所造成的翻覆力矩大於貯存設施本身自重對 A 點及 B 點所形成的穩定力矩，則貯存設施有翻覆的可能。

NUHOMS[®] 貯存設施因本身重量所形成的穩定力矩 M_{st} 為：

$$\text{對 A 點：} M_{stA} = (M_{HD} + M_r)gd + M_e g(w + t_g + t_s / 2) \quad (5.21a)$$

$$\text{對 B 點： } M_{stB} = (M_{HD} + 2M_e)gL/2 \quad (5.21b)$$

其中：

d ：貯存設施中質心到側牆外邊緣的水平距離， $d = 1.4732 \text{ m}$ (58 in)。

L ：貯存設施的長度， $L = 6 \text{ m}$ (238 in)。

t_g ：屏蔽牆和 HSM 牆面的間隙， $t_g = 0.1524 \text{ m}$ (6 in)。

t_s ：屏蔽牆的厚度， $t_s = 0.61 \text{ m}$ (24 in)。

w ：貯存設施的寬度， $w = 2.9 \text{ m}$ (116 in)。

g 、 M_{HD} 、 M_e 及 M_r 的定義同前。

將各項數值代入(5.21a)及(5.21b)式，可得穩定力矩 $M_{stA} = 3.91 \text{ MJ}$ ， $M_{stB} = 6.75 \text{ MJ}$ 。

地震對貯存設施所造成的翻覆力矩為：

$$\begin{aligned} \text{對 A 點： } M_{otA} = & (M_{HD} + M_r)a_v d + M_e a_v (w + t_g + t_s / 2) \\ & + M_{HD} a_h h_a + (2M_e + M_r)a_h h / 2 \end{aligned} \quad (5.22a)$$

$$\text{對 B 點： } M_{otB} = (M_{HD} + 2M_e)a_v L / 2 + M_{HD} a_h h_a + M_e a_h h \quad (5.22b)$$

其中 h 為貯存設施的高度， $h = 180 \text{ in}$ ；而 a_h 、 a_v 、 d 、 L 、 w 、 M_{HD} 、 M_e 、 M_r 、 t_g 及 t_s 的定義同前。經由計算，可求得地震對貯存設施所造成的翻覆力矩 $M_{otA} = 2.62 \text{ MJ}$ ， $M_{otB} = 2.99 \text{ MJ}$ 。此些力矩分別小於貯存設施本身的穩定力矩 M_{stA} 及 M_{stB} ，故 NUHOMS[®] 貯存設施不會因為地震負荷作用而發生翻覆。防止翻覆的安全因數對 A 點而言為 1.49，對 B 點為 2.26。

由上述的分析可知，貯存設施相對於 A 點較易產生翻覆，由(5.21a)

式及(5.22a)式可知，當最大水平地震加速度 $a_h = 0.45\text{ g}$ 時，貯存設施的翻覆力矩會大於其本身的穩定力矩，造成翻覆。

5.3 HOLTEC 貯存設施滑動和翻覆分析

(1) 滑動分析

當自由站立的 HI-STORM 100 受到地震作用時，垂直向上的地震作用力會使得 HI-STORM 100 作用於地板上的重量減輕，減少其抵抗滑動的力量，使得抵抗滑動的力量變為：

$$F_{sl} = M(g - a_v) \cdot \mu \quad (5.23)$$

上式中 M 為 HI-STORM 100 貯存設施的質量， $M = 163293\text{ kg}$ ； a_v 、 g 及 μ 的定義同前。經由計算，可得滑動摩擦阻力 $F_{sl} = 0.77\text{ MN}$ 。

而水平地震負荷會使得 HI-STORM 100 具有滑動的傾向，所產生的水平橫向力為：

$$F_{hs} = Ma_h \quad (5.24)$$

上式中 a_h 及 M 的定義同前。經由計算，可得 $F_{hs} = 0.48\text{ MN}$ 。此水平橫向力小於移動 HI-STORM 100 所需最小力量 F_{sl} ，故 HI-STORM 100 不會因地震負荷作用而滑動。防止 HI-STORM 100 滑動的安全因數為 1.6。

由(5.12)式可知，當水平地表加速度大於 0.429 g 時，HOLTEC 貯存系統會產生滑動。

(2) 翻覆分析

HI-STORM 100 貯存設施因本身重量所形成的穩定力矩 M_{st} 為：

$$M_{st} = Mgr \quad (5.25)$$

其中 r 為 HI-STORM 100 貯存設施的半徑， $r = 1.6827$ m；而 g 、 M 的定義同前。將各項數值代入(5.25)式，可得穩定力矩 $M_{st} = 2.69$ MJ。

地震對 HI-STORM 100 貯存設施所造成的翻覆力矩為：

$$M_{ot} = M(a_h h / 2 + a_v r) \quad (5.26)$$

其中 h 為 HI-STORM 100 貯存設施的高度， $h = 6.0833$ m；而 a_h 、 a_v 、 M 及 r 的定義同前。經由計算，可求得地震對 HI-STORM 100 貯存設施所造成的翻覆力矩 $M_{ot} = 2$ MJ，此力矩小於 HI-STORM 100 貯存設施本身的穩定力矩 M_{st} ，故 HI-STORM 100 貯存設施不會因為地震負荷作用而翻覆。防止翻覆的安全因數為 1.35。

另外，由(5.25)式及(5.26)式可知，當最大水平地震加速度 $a_h = 0.4$ g 時，貯存設施的翻覆力矩會大於其本身的穩定力矩，造成翻覆。

5.4 結論

本章利用力平衡的觀念，推導造成自由站立物體滑動和翻覆的條件，建立判斷滑動和翻覆的準則。本章同時利用此準則分別針對 NUHOMS[®]和 HOLTEC 等兩種不同類型的貯存設施進行滑動和翻覆穩定性的比較，經由計算，可得到下列的結論：

- (1)經由分析比較可知，NUHOMS[®]貯存設施抵抗滑動的能力和 HOLTEC 貯存設施一樣，安全係數均為 1.6，主要原因為造成滑動的條件只和

摩擦係數及水平和垂直地表加速度有關，而和貯存設施本身的重量及底座型式無關。另外，由計算結果可知，HOLTEC 貯存設施抵抗翻覆的能力較 NUHOMS[®] 貯存設施為小，當大地震來臨時，較易產生翻覆，究其原因為 HOLTEC 貯存設施的重心較高，所產生的翻覆力矩較大所致。

(2)本章有關 HOLTEC 貯存設施滑動和翻覆的計算結果和第四章利用動力分析方法所計算的結果不太一致，主要不一樣之處為在本章中，當水平地震加速度大於 0.43 g 時，HOLTEC 貯存設施才會發生滑動，而第四章的分析結果則顯示當地震強度在 0.3 g 時，貯存設施就會發生滑動；另外，在翻覆方面，由本章的分析結果可知，當水平地震強度大於 0.4 g 時，HOLTEC 貯存系統才會發生翻覆，而在第四章的動力分析結果則顯示地震強度在 1.0 g 時，貯存設施仍然不會發生翻覆。

造成兩者分析結果不一致之處為第四章乃是利用 LS-DYNA 進行精確的動力計算，地震負荷為真實的地表加速度歷時反應，分析結果較能反應真實的狀況，而本章僅利用簡單的力平衡觀念推導造成滑動和翻覆的條件，地震加速度設定為常數，和實際的地震反應並不一樣，故所計算出來的結果也較為粗略。所以利用兩種不同分析方法所分析出來的結果也會有所差異。

雖然利用不同的分析方法會得到不同的滑動和翻覆結果，然而，本章所建立的滑動和翻覆準則仍可作為自由站立貯存設施穩定性快速的判斷依據，值得設計人員及業主參考。

6. 地震法規研議

6.1 最新地震法規的研議

過去依據10CFR100 附錄A決定核能電廠的廠址設計地震出現以下的缺失：

1. 由於定性論法中未包含地球科學參數的不準度。因此，地震危害度分析即以明確納入地表運動評估的不準度，並提供一套方法以評估各參數的敏感度。但於第10章第100部附錄A並未容許此應用。
2. 受限於地質/地震分析及數據，及地球科學知識的快速更新，已提供相當技術判斷的自由度。在附錄A中還禁止使用詳細地球科學評估所須的判斷，及在新位置應用基本原理的彈性。
3. 附錄A的不同節受到不同的解釋。例如各個專家對於須考慮的最大地震及所使用地表運動模式就有不同的見解，因此常使得核照過程變得漫長而無法預期。

因此，美國核管會於2002年頒布管制指引1.165 (Regulatory Guide 1.165)，要求核能電廠的設計地震需納入地震危害度評估方法。同樣的，對用過核子燃料乾式獨立貯存設施或受監測可取出的貯存設施的地震設計，亦比照納入地震危害度評估與敏感度分析方法。

美國核能管制委員會(USNRC)於2003年9月16日發布新的命令(Approval Number 3150-AG93)修改其對用過核子燃料、高放射性廢料及高於C級核能相關廢料(Greater Than Class C, GTCC)放置於乾罐式之用過核子燃料乾式獨立貯存設施(Independent Spent Fuel Storage Installations, ISFSI)或美國能源部(U.S. DOE)之受監測可取出的貯存設施

(Monitored Retrievable Storage Installations, MRS)的核照要求。此修改是將地質、地震及地震工程納入考量，以更新場址地震選擇及設計準則。

最終條例可讓美國核管會及現有持照者雙方從現有設施的核照經驗中及納入地球科學(earth science)及地震工程技術的快速進展中獲得利益。此修改所制訂美國核管會規章，可使得ISFSI及MRS將核能電廠的地震危害分析不準度納入考量，以更符合1996年規定的要求。本項修改容許某些ISFSI或MRS申請者，可使用與ISFSI或MRS廠址等量風險考量的設計地震值。此規章於2003年10月16日起生效。

對於 ISFSI 及 MRS 特殊執照持照者的地震設計，主要修改 10CFR72.102 的標題，並新增 10CFR72.103，對通用執照持照者則修改 § 72.212(b)(2)(i)(B)

1. § 72.103的修訂

- (1) 在最終條例有效日起及以後的乾罐式貯存之ISFSI或MRS申請者，其廠址位於美國西區及美國東區的已知地震活動帶，且其位置不與核能電廠位於相同廠址時；當決定其設計地震時，需經由適當的分析-如地震危害度分析或適當的敏感度分析以說明地震危害分析的不準度。
- (2) 在最終條例有效日起及以後的乾罐式貯存之ISFSI或MRS申請者，其廠址位於美國西區及美國東區的已知地震活動帶且其位置與核能電廠位於相同廠址時，其設計地震的決定，可經由適當的分析-如地震危害度分析或適當的敏感度分析，或使用其他選擇-使用現行核能電廠的設計準則，來說明其地震危害分析的不準度。當使用現行核能電廠的設計準則，評估多個核能電廠的ISFSI場址時，需使用最近核能電廠的設計準則。
- (3) 在最終條例有效日起及以後的乾罐式貯存之ISFSI或MRS申

請者，其廠址不位於美國東區的已知地震活動帶。其設計地震的決定，可經由適當的分析-如地震危害度分析或適當的敏感度分析，或使用其他選擇-使用標準化核能電廠設計地震的適當的反應譜 (0.25g subject to the conditions in new § 72.103(a)(1))，或使用現行最近核能電廠的設計準則，來說明其地震危害分析的不準度，並決定其設計地震。

(4) 依據第72部美國通用執照的規定，最新的§ 72.103 並不適用於現行運轉之核能電廠的ISFSI通用執照。此變更適用於ISFSI及MRS之乾罐式貯存型態的設計，乃由於此兩種設備採用相似的設計。美國核管會並未企圖修訂聯辦法規第10章第72部，將地質學及地震學的準則納入濕式型態貯存的應用。此乃不預期使用此種貯存方式，且此種方式對確認震源的位置以建立法規條例擴展使用的技術基礎也不具經濟效率。由於對不使用罐式的乾式貯存設施缺乏核照的經驗，美國核管會同樣並不會修改聯辦法規第10章第72部地質學的及地震學的準則。

2.修正 § 72.212(b)(2)(i)(B)

基於§ 72.212(b)(2)(i)(B)中的變更，所有ISFSI通用執照查照者須對貯存罐基礎板其區域進行動態負荷評估。§ 72.103及§ 72.212(b)(2)(i)(B)的應用性摘錄於表6-1。

本命令詳細的內容，請參見附錄C。10CFR72變更的詳細比較列於附錄C的第VII段。

6.2 美國核管會法規指引 3.73

配合美國核管會最近發行聯辦法規 10CFR72”Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High

Level Radioactive Waste, and Reactor-Related Greater Than Class C Waste.”的修正。第 72 部第 103 節“Geological and Seismological Characteristics for Application for Dry Modes of Storage on or after October 16,2003,”(f)(1)段，要求須對用過核子燃料中期貯存設施之場址的地質(geological)、地震(seismic)、工程特性(Engineering Characteristics)與環境(environs)，進行適當規模及詳細程度的調查，以提供對預定廠址進行評估。所提供的充分資訊，可以達成設計地震(Design Earthquake, DE)的評估，及確認對預定廠址之實際或可能存在的地質與地震影響的評估，採取適當的工程解決方案。在 10CFR72.103 第(f)(2)段要求對廠址選擇之地質與地震等參數需可滿足用以建立廠址的設計地震、決定地質的表面構造及非構造的變形、地震誘發洪水及水波(海嘯)的設計基準及其他的設計條件。在 10CFR72.103(f)(2)(i)要求將評估設計地震的不準度，須經由適當的分析-如地震危害度評估(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PHSA)及合適的敏感度分析(Suitable Sensitive Study)加以說明。美國核管會隨後於 2003 年 10 月發行管制指引 3.73 (Regulatory Guide 3.73)。

本指引已經建立及提供一個美國核能管制委員會可接受的程序，以作為(1) 執行廠址區域之地質學、基礎穩定性的詳細評估。(2) 執行調查以確認及描述廠址區域震源的不準度對地震危害度分析的影響 (3)評估與描述震源中的不準度參數(4)執行廠址地震危害度分析(5) 訂定符合 10CFR 72 的設計地震值。

這個指引含有數個附錄，以達成前面揭示的目標。附錄 A 為相關術語定義的列表。附錄 B 討論機率論地表運動程度及控制地震的決定，並建立地震危害資訊基礎。附錄 C 討論有關場址的地質學、地震學與地球物理科學的調查。附錄 D 提供確認現存為適當震源的方法和決定廠址設計地震的震源參數基準。附錄 E 說明建立設計地震的程序。

6.3 其他

未來NUREG-1536, 「Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems」及NUREG-1567, 「Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities,」也將進行編輯上的變更。例如, 標準審查計畫將更新以參考§ 72.103及管制指引 3.73。

7. 結論與建議

對於本計畫執行結果、相關結論及未來後續研究之建議，將在本章中加以陳述。

7.1 分析結果

本計畫執行之分析項目主要包含土壤-結構互制作用分析、HI-STORM 100[®] 貯存設施滑動和翻覆分析、NUHOMS[®]和 HOLTEC 貯存設施穩定性分析等三大部分，以下將此三部份分析結果分別歸納如下：

(1) 依據核一廠設計反應譜建立歷時圖

計畫依據最新核一廠的設計反應譜，分別應用 SIMQKE[®]及 STARDYNE[®] 建立非線性地震分析所需的歷時圖，並依據 NUREG-0800 標準審查計畫 3.7 節規定完成反應譜檢驗。

(2) 土壤-結構互制作用分析

(a) 以 SHAKE 91 將核一廠土壤動力特性等效線性化，並分析地震歷時記錄考慮土壤動力特性後之結果，分析結果顯示現地土壤狀況對地震反應有些許放大效應，依現場地質狀況判斷應屬合理；並將現地土壤經地震作用後所受應力及應變等資料繪製成圖，以供參考。

(b) 將經過 SHAKE 91[®] 等效線性化後之歷時記錄，代入 SASSI[®] 程式分析，求得土壤-結構互制作用效應，以做為貯存罐滑動和翻覆與否之輸入資料。

(3) HI-STORM100[®] 貯存設施滑動和翻覆分析。

(a) 在滑動部分：

考量在最大地表加速度分別為 0.3g、0.5g、0.8g 及 1.0g 的情況作用下，並且假設摩擦係數分別為 0.2、0.4、0.6，在交叉分析後之結果，所有狀況下貯存罐均產生滑動，而且加速度愈大，摩擦係數愈小，則滑動距離也將愈大。

(b) 翻覆部分：

考量在最大地表加速度分別為 0.3g、0.5g、0.8g 及 1.0g 的情況作用下，並且假設摩擦係數分別為 0.2、0.4、0.6，在交叉分析後之結果，所有狀況下貯存罐均不致造成翻覆，就整體而言，在加速度愈大，摩擦係數愈大的情況下，貯存罐晃動的角度也將愈大，與一般的判斷亦相符，並且在動態分析影片中，貯存罐受地震作用將產生圓周式的晃動及移動，但在所有的假設狀況下終將歸於靜止。

(4) NUHOMS[®]和 HOLTEC 貯存設施穩定性分析。

經分析結果，NUHOMS[®]和 HOLTEC 貯存罐防止翻覆的安全因數分別為 NUHOMS[®]的 1.49、2.26 及 HOLTEC HI-STORM 100 的 1.35，以較保守的情況而言，NUHOMS[®]的穩定性仍較 HI-STORM 100 為高，因為 HI-STORM 100 貯存罐的重心位置較高所致。

(5) 最新地震法規研議

計畫將最新 10CFR72 及管制指引 3.73 對設計地震的修訂重點摘錄於本文中，並將詳細的說明附於附錄 C 及附錄 D。

依據最新的規定，座落於核電廠內的用過核子燃料中期貯存設施的基礎板需考量動態負荷，進行土壤結構互制分析。

7.2 檢討與建議

綜合檢討本次計畫分析結果，提出以下數點建議：

(1) 土壤具有地震放大作用，土壤-結構互制分析有其必要性：

由此次之分析可得知，土壤對地震作用具有一定的放大效應，根據相關文獻記載，土壤壓密程度愈差，亦即土壤愈鬆軟者，對地震之放大效應愈顯著，至於實際的放大情況，則需加以分析之後才可得知，可見對於重要設施而言，分析土壤-結構互制效應實有其必要性。

(2) 貯存罐放置須考量滑動及晃動之可能性：

經實際動態分析後可知，貯存罐雖在設定的地震作用下不致翻覆，但滑動及晃動則屬難以避免，需求單位應針對此特性及早謀求對策，再設計貯存場地及安置時多加考量，以免造成貯存罐間相互碰撞而造成損害。

(3) HOLTEC HI-STORM 100 翻覆穩定性較差，但安置所需之面積較小，對現場土地可做充分利用，是否以其他方式加強以彌補翻覆穩定性之不足，並充分利用土地面積，或選擇 NUHOMS[®] 以保障貯存罐較不虞翻覆，則有賴需求單位加以明智的抉擇了。

參考資料

- [1] Transnuclear West, Inc., "Final Safety Analysis Report for the Standardized NUHOMS® Horizontal Modular Storage System for Irradiated Nuclear Fuel", August 2000.
- [2] USNRC, NUREG-1536, "Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems", Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Jan. 1997.
- [3] 行政院原子能委員會核能研究所, 陳建忠, "用過核子燃料中期貯存設施之結構安全獨立驗算模式", 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計劃報告, 民國 91 年 11 月.
- [4] "ASME B&PV CODE", Section III, Division 1, Subsection NB, 1998.
- [5] American Concrete Institute, "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures and Commentary", ACI 349-85 and ACI 349R-85, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1980.
- [6] HOLTEC (2003), Final Safety Analysis Report for the HOLTEC International Storage and Transfer Operation Reinforced Module Cask System (HI-STORM 100 Cask System), Docket 72-1014.
- [7] 10 CFR Part 100, Appendix A, "Seismic and Geologic Siting Criteria for Nuclear Power Plants."
- [8] Taiwan Power Company, "Final Safety Analysis Report, CHINSHAN nuclear power station, Unit 1 & 2", 1986.
- [9] 益鼎工程股份有限公司, "核一、二廠用過核子燃料中期貯存設施計畫候選廠址工程地質調查報告", 台灣電力公司, 民國 81 年 12 月
- [10] U. S. Nuclear Regulatory Commission, " Standard Review Plan," NUREG-0800, Revision 1, July 1981.

- [11] I.M Idriss, Joseph I. Sun, "User's manual for SHAKE91", Center for Geotechnical Modeling Department of Civil & Environmental Engineering University of California, 1992
- [12] ANSYS Inc, "ANSYS" Ver 5.7, Nov. 2000
- [13] U.S. Government, "Licensing Requirements for the Storage of Spent Fuel in an Independent Spent Fuel Storage Installation (ISFSI)", Title 10 Code of Federal Regulations, Part 72, Office of the Federal Register, Washington, D.C.
- [14] American National Standard, "Design Criteria for an Independent Spent Fuel Storage Installation (Dry Storage Type)," ANSI/ANS 57.9-1992, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, 1992
- [15] 物管局, "用過核燃料廠內乾式貯存設施設置管制規範", July 3, 1995.
- [16] 物管局, "用過核燃料廠內乾式貯存設施安全分析報告導則", Jan. 23, 1997.
- [17] 物管局, "用過核燃料中期貯存設施水平放置之熱傳驗算模式建立", Jan. ,2001
- [18] Sun, J. I., Golesorkhi, R. and Seed, H. Bolton, "Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils", Report No. UCB/EERC-88/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1988.
- [19] Idriss, I. M. "Response of Soft Soil Site during Earthquakes", Proceedings, Memorial Symposium to honor Professor Harry Bolton Seed, Berkeley, California, Vol. II, 1990.
- [20] Seed, H. B. and Idriss, I. M., "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis", Report No. EERC 70- 10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley,

December 1970.

- [21] Schnabel, P. B., Seed, H. B., and Lysmer, J., "SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December 1972.

表 3.1 地質特性資料表

編號	土層描述	平均厚度 (ft)	初始阻尼	總單位重 (kips/ft ³)	最大剪力波 速 (ft/sec)	最大剪力模 數 Gmax (kips/ft ²)
1	深褐色表土	6.8	0.05	0.12	877	與剪力波速 擇一
2	粗砂夾有機 物、礫石	29.2	0.05	0.13	1630	與剪力波速 擇一
3	灰色砂岩	80.5	0.01	0.14	2081	與剪力波速 擇一

表 4.1 HI-STORM 100[®] 貯存設施設計參數

Component	MPCs	HI-STORM 100
Overall Height (in.)	190.31	HI-STORM 100 239.5 w/lid, 227.25 w/o lid HI-STORM 100S 231.25 w/lid, 211.125 w/o lid
O.D. (in.)	68.375	132.5
Cavity I.D. (in.)	67.375	69.5
Cavity Height (in.)	178.0 (MPC-68)	191.5
Empty Weight (lbs.)	39,641 (MPC-68)	267,190
Max. Loaded Weight (lbs.)	88,000 (MPC-68)	354,431

HI-STORM Overpack Datasheet

Height (in.)	
HI-STORM 100S	239.5 w/lid, 227.25 w/o lid
HI-STORM 100	231.25 w/lid, 211.125 w/o lid
Shell O.D. (in.)	132.5
Cavity I.D. (in.)	69.5
Weight, empty (lbs)	267,190
Weight loaded with heaviest MPC (lbs)	354,431
Number of bottom ducts	4
Bottom duct size (in.)	15×10
Number of top ducts	4
Top-duct size (in.)	25×6

表 4.2 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ	3 UX BODY_UZB	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0023
0.2000	0.0000	0.0006	-0.0154	-0.0154	0.0009	0.0429
0.4000	0.0185	0.0001	-0.0429	-0.0429	0.0028	0.1112
0.6000	0.0666	0.0215	-0.0395	-0.0392	0.0038	-0.3184
0.8000	0.0352	0.0300	-0.0709	-0.0709	-0.0002	-0.0375
1.0000	0.0285	0.0295	-0.0738	-0.0738	-0.0022	0.1911
1.2000	0.0302	0.0303	-0.0729	-0.0729	0.0030	-0.2397
1.4000	0.0355	0.0355	-0.0686	-0.0686	0.0096	-1.1617
1.6000	0.0355	0.0356	-0.0687	-0.0687	0.0095	-0.2627
1.8000	0.0408	0.0408	-0.0639	-0.0639	0.0166	0.5428
2.0000	0.0475	0.0475	-0.0579	-0.0579	0.0256	1.9342
2.2000	0.0591	0.0591	-0.0485	-0.0485	0.0397	-0.7302
2.4000	0.0657	0.0657	-0.0444	-0.0444	0.0458	-0.0226
2.6000	0.0683	0.0683	-0.0432	-0.0432	0.0477	0.2853
2.8000	0.0747	0.0748	-0.0359	-0.0359	0.0587	1.1890
3.0000	0.1015	0.1016	-0.0177	-0.0177	0.0860	0.4027
3.2000	0.1240	0.1240	-0.0050	-0.0050	0.1050	0.2506
3.4000	0.1481	0.1481	0.0125	0.0125	0.1312	0.4499
3.6000	0.1770	0.1770	0.0310	0.0310	0.1590	1.6950
3.8000	0.2036	0.2037	0.0472	0.0472	0.1834	1.1081
4.0000	0.2194	0.2195	0.0583	0.0583	0.2000	-0.1973
4.2000	0.2494	0.2494	0.0803	0.0803	0.2329	-1.7426
4.4000	0.2870	0.2870	0.1062	0.1062	0.2718	-0.2561
4.6000	0.3351	0.3351	0.1387	0.1387	0.3205	0.6018
4.8000	0.3771	0.3772	0.1654	0.1654	0.3606	-0.4654
5.0000	0.4102	0.4103	0.1869	0.1869	0.3929	-0.1496
5.2000	0.4587	0.4587	0.2187	0.2187	0.4405	0.1702
5.4000	0.5001	0.5002	0.2471	0.2471	0.4832	-0.0647
5.6000	0.5585	0.5586	0.2865	0.2865	0.5423	1.0337
5.8000	0.6129	0.6129	0.3211	0.3211	0.5941	-2.3002
6.0000	0.6691	0.6691	0.3582	0.3583	0.6499	0.1903
6.2000	0.7189	0.7190	0.3906	0.3906	0.6984	-0.2287
6.4000	0.7652	0.7653	0.4217	0.4218	0.7452	0.7430
6.6000	0.8089	0.8089	0.4480	0.4480	0.7845	-0.3994
6.8000	0.8285	0.8285	0.4585	0.4585	0.8002	-0.1158
7.0000	0.8329	0.8328	0.4612	0.4612	0.8042	-0.8214
7.2000	0.8353	0.8354	0.4642	0.4642	0.8087	-1.0825
7.4000	0.8434	0.8436	0.4695	0.4696	0.8168	1.1039
7.6000	0.8575	0.8575	0.4789	0.4790	0.8309	-0.4095
7.8000	0.8696	0.8695	0.4869	0.4869	0.8429	-0.0825
8.0000	0.8817	0.8818	0.4951	0.4952	0.8552	0.2614
8.2000	0.8957	0.8957	0.5044	0.5044	0.8691	-0.1207
8.4000	0.9036	0.9035	0.5095	0.5096	0.8768	-0.2715
8.6000	0.9038	0.9038	0.5098	0.5098	0.8772	-0.0631
8.8000	0.9016	0.9016	0.5081	0.5081	0.8749	0.0428
9.0000	0.8997	0.9000	0.5069	0.5070	0.8734	-0.0117
9.2000	0.8986	0.8988	0.5061	0.5061	0.8721	0.0551
9.4000	0.8986	0.8987	0.5061	0.5061	0.8721	-0.0089
9.6000	0.8986	0.8987	0.5061	0.5061	0.8721	0.0146
9.8000	0.8987	0.8987	0.5061	0.5061	0.8721	-0.0023
10.0000	0.8987	0.8987	0.5061	0.5061	0.8721	-0.0026

表 4.3 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0023
0.2000	0.0000	0.0006	-0.0150	-0.0151	0.0009	0.0429
0.4000	0.0185	0.0007	-0.0432	-0.0431	0.0028	0.1111
0.6000	0.0738	-0.0013	-0.0280	-0.0270	0.0039	-0.3184
0.8000	-0.0247	-0.0067	-0.0623	-0.0622	-0.0002	-0.0375
1.0000	-0.0639	-0.0109	-0.0560	-0.0556	-0.0022	0.1912
1.2000	0.0337	-0.0032	-0.0593	-0.0591	0.0030	-0.2396
1.4000	0.0120	0.0051	-0.0662	-0.0661	0.0096	-1.1616
1.6000	-0.0148	0.0001	-0.0634	-0.0633	0.0095	-0.2628
1.8000	0.0163	0.0089	-0.0613	-0.0612	0.0166	0.5428
2.0000	0.0203	0.0169	-0.0566	-0.0565	0.0256	1.9343
2.2000	0.0297	0.0318	-0.0478	-0.0477	0.0397	-0.7303
2.4000	0.0391	0.0380	-0.0440	-0.0439	0.0458	-0.0227
2.6000	0.0425	0.0420	-0.0430	-0.0430	0.0476	0.2848
2.8000	0.0521	0.0522	-0.0358	-0.0358	0.0586	1.1891
3.0000	0.0795	0.0795	-0.0177	-0.0177	0.0859	0.4029
3.2000	0.0991	0.0991	-0.0051	-0.0050	0.1049	0.2506
3.4000	0.1252	0.1252	0.0124	0.0124	0.1311	0.4500
3.6000	0.1535	0.1535	0.0309	0.0309	0.1589	1.6950
3.8000	0.1786	0.1787	0.0472	0.0472	0.1833	1.1079
4.0000	0.1945	0.1946	0.0583	0.0583	0.2000	-0.1966
4.2000	0.2276	0.2276	0.0802	0.0802	0.2328	-1.7425
4.4000	0.2669	0.2669	0.1062	0.1062	0.2718	-0.2556
4.6000	0.3156	0.3156	0.1386	0.1386	0.3204	0.6016
4.8000	0.3560	0.3560	0.1653	0.1653	0.3605	-0.4649
5.0000	0.3892	0.3892	0.1869	0.1869	0.3929	-0.1495
5.2000	0.4378	0.4377	0.2186	0.2186	0.4404	0.1706
5.4000	0.4801	0.4801	0.2471	0.2471	0.4831	-0.0647
5.6000	0.5392	0.5391	0.2865	0.2865	0.5422	1.0340
5.8000	0.5922	0.5922	0.3211	0.3211	0.5941	-2.3005
6.0000	0.6486	0.6486	0.3582	0.3582	0.6498	0.1900
6.2000	0.6972	0.6971	0.3905	0.3905	0.6983	-0.2288
6.4000	0.7439	0.7439	0.4217	0.4217	0.7451	0.7428
6.6000	0.7839	0.7838	0.4480	0.4480	0.7844	-0.3993
6.8000	0.8004	0.8003	0.4584	0.4584	0.8001	-0.1160
7.0000	0.8043	0.8042	0.4611	0.4611	0.8041	-0.8213
7.2000	0.8086	0.8085	0.4642	0.4642	0.8086	-1.0825
7.4000	0.8165	0.8165	0.4695	0.4695	0.8167	1.1039
7.6000	0.8307	0.8307	0.4789	0.4789	0.8308	-0.4095
7.8000	0.8427	0.8427	0.4868	0.4868	0.8428	-0.0825
8.0000	0.8549	0.8550	0.4951	0.4951	0.8551	0.2614
8.2000	0.8687	0.8688	0.5043	0.5043	0.8689	-0.1207
8.4000	0.8764	0.8766	0.5095	0.5095	0.8767	-0.2715
8.6000	0.8768	0.8770	0.5098	0.5098	0.8771	-0.0631
8.8000	0.8746	0.8747	0.5080	0.5080	0.8748	0.0428
9.0000	0.8730	0.8731	0.5069	0.5069	0.8732	-0.0117
9.2000	0.8718	0.8719	0.5060	0.5061	0.8720	0.0551
9.4000	0.8716	0.8718	0.5060	0.5060	0.8720	-0.0089
9.6000	0.8717	0.8718	0.5060	0.5060	0.8720	0.0146
9.8000	0.8718	0.8718	0.5060	0.5060	0.8720	-0.0023
10.0000	0.8716	0.8718	0.5060	0.5060	0.8720	-0.0026

表 4.4 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0023
0.2000	0.0000	0.0006	-0.0149	-0.0150	0.0009	0.0429
0.4000	0.0188	0.0007	-0.0434	-0.0434	0.0028	0.1111
0.6000	0.0762	-0.0032	-0.0269	-0.0259	0.0039	-0.3184
0.8000	-0.0210	-0.0129	-0.0668	-0.0668	-0.0002	-0.0375
1.0000	-0.0503	-0.0177	-0.0570	-0.0568	-0.0022	0.1911
1.2000	0.0030	-0.0073	-0.0656	-0.0655	0.0030	-0.2397
1.4000	-0.0102	-0.0012	-0.0659	-0.0659	0.0096	-1.1616
1.6000	0.0117	-0.0029	-0.0633	-0.0632	0.0095	-0.2628
1.8000	-0.0167	0.0038	-0.0564	-0.0564	0.0166	0.5425
2.0000	0.0344	0.0129	-0.0502	-0.0501	0.0256	1.9343
2.2000	0.0130	0.0270	-0.0435	-0.0434	0.0397	-0.7302
2.4000	0.0457	0.0333	-0.0401	-0.0400	0.0458	-0.0226
2.6000	0.0326	0.0350	-0.0422	-0.0421	0.0476	0.2848
2.8000	0.0353	0.0459	-0.0325	-0.0324	0.0586	1.1890
3.0000	0.0748	0.0732	-0.0169	-0.0169	0.0859	0.4029
3.2000	0.0980	0.0923	-0.0018	-0.0018	0.1049	0.2506
3.4000	0.1155	0.1182	0.0134	0.0135	0.1311	0.4501
3.6000	0.1405	0.1460	0.0327	0.0327	0.1588	1.6950
3.8000	0.1783	0.1705	0.0503	0.0504	0.1832	1.1080
4.0000	0.1882	0.1871	0.0591	0.0591	0.1999	-0.1974
4.2000	0.2223	0.2200	0.0810	0.0810	0.2327	-1.7425
4.4000	0.2607	0.2589	0.1069	0.1069	0.2716	-0.2556
4.6000	0.3096	0.3082	0.1390	0.1390	0.3203	0.6016
4.8000	0.3454	0.3476	0.1670	0.1670	0.3603	-0.4648
5.0000	0.3684	0.3811	0.1909	0.1910	0.3927	-0.1494
5.2000	0.4472	0.4285	0.2251	0.2252	0.4402	0.1702
5.4000	0.4539	0.4708	0.2541	0.2542	0.4828	-0.0647
5.6000	0.5498	0.5299	0.2935	0.2936	0.5419	1.0341
5.8000	0.5633	0.5818	0.3276	0.3276	0.5937	-2.3005
6.0000	0.6478	0.6375	0.3619	0.3619	0.6494	0.1901
6.2000	0.6912	0.6859	0.3922	0.3922	0.6978	-0.2286
6.4000	0.7270	0.7327	0.4234	0.4235	0.7446	0.7429
6.6000	0.7717	0.7722	0.4482	0.4482	0.7839	-0.3993
6.8000	0.8027	0.7882	0.4639	0.4640	0.7996	-0.1165
7.0000	0.7767	0.7922	0.4665	0.4666	0.8036	-0.8210
7.2000	0.7915	0.7969	0.4657	0.4657	0.8081	-1.0826
7.4000	0.8130	0.8049	0.4718	0.4718	0.8162	1.1040
7.6000	0.8275	0.8190	0.4814	0.4814	0.8303	-0.4095
7.8000	0.8272	0.8310	0.4884	0.4884	0.8423	-0.0824
8.0000	0.8385	0.8433	0.4973	0.4973	0.8546	0.2614
8.2000	0.8522	0.8571	0.5057	0.5057	0.8684	-0.1207
8.4000	0.8606	0.8649	0.5106	0.5107	0.8762	-0.2715
8.6000	0.8655	0.8652	0.5099	0.5099	0.8766	-0.0631
8.8000	0.8636	0.8629	0.5081	0.5082	0.8743	0.0428
9.0000	0.8626	0.8614	0.5071	0.5072	0.8727	-0.0117
9.2000	0.8607	0.8602	0.5060	0.5060	0.8715	0.0551
9.4000	0.8605	0.8601	0.5059	0.5059	0.8715	-0.0089
9.6000	0.8601	0.8601	0.5058	0.5058	0.8715	0.0146
9.8000	0.8603	0.8601	0.5058	0.5058	0.8715	-0.0023
10.0000	0.8600	0.8601	0.5058	0.5058	0.8715	-0.0026

表 4.5 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX GROUND_UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0038
0.2000	-0.0001	0.0010	-0.0150	-0.0150	0.0015	0.0715
0.4000	0.0263	-0.0016	-0.0451	-0.0450	0.0047	0.1852
0.6000	0.0990	0.0188	-0.0391	-0.0381	0.0064	-0.5307
0.8000	0.0653	0.0485	-0.0701	-0.0700	-0.0004	-0.0625
1.0000	0.0281	0.0352	-0.0744	-0.0744	-0.0036	0.3185
1.2000	0.0349	0.0348	-0.0716	-0.0716	0.0050	-0.3997
1.4000	0.0444	0.0444	-0.0643	-0.0643	0.0161	-1.9360
1.6000	0.0465	0.0465	-0.0645	-0.0645	0.0158	-0.4380
1.8000	0.0574	0.0574	-0.0566	-0.0566	0.0277	0.9045
2.0000	0.0716	0.0717	-0.0465	-0.0465	0.0427	3.2238
2.2000	0.0942	0.0942	-0.0309	-0.0309	0.0662	-1.2173
2.4000	0.1097	0.1097	-0.0241	-0.0241	0.0764	-0.0375
2.6000	0.1156	0.1156	-0.0220	-0.0220	0.0795	0.4751
2.8000	0.1270	0.1270	-0.0098	-0.0098	0.0978	1.9817
3.0000	0.1692	0.1692	0.0205	0.0205	0.1433	0.6714
3.2000	0.2108	0.2108	0.0416	0.0416	0.1749	0.4176
3.4000	0.2496	0.2496	0.0708	0.0708	0.2186	0.7501
3.6000	0.3016	0.3017	0.1016	0.1016	0.2649	2.8249
3.8000	0.3478	0.3478	0.1287	0.1287	0.3056	1.8469
4.0000	0.3731	0.3732	0.1472	0.1472	0.3333	-0.3283
4.2000	0.4168	0.4168	0.1837	0.1837	0.3881	-2.9043
4.4000	0.4804	0.4804	0.2270	0.2270	0.4530	-0.4270
4.6000	0.5582	0.5582	0.2811	0.2811	0.5341	1.0030
4.8000	0.6289	0.6289	0.3256	0.3256	0.6009	-0.7757
5.0000	0.6869	0.6869	0.3615	0.3616	0.6549	-0.2493
5.2000	0.7654	0.7654	0.4144	0.4144	0.7342	0.2845
5.4000	0.8344	0.8344	0.4618	0.4618	0.8053	-0.1078
5.6000	0.9309	0.9310	0.5275	0.5275	0.9038	1.7236
5.8000	1.0251	1.0250	0.5851	0.5851	0.9903	-3.8338
6.0000	1.1186	1.1184	0.6471	0.6471	1.0831	0.3178
6.2000	1.2018	1.2015	0.7010	0.7010	1.1640	-0.3813
6.4000	1.2787	1.2786	0.7530	0.7530	1.2419	1.2379
6.6000	1.3562	1.3559	0.7967	0.7967	1.3075	-0.6655
6.8000	1.3928	1.3923	0.8142	0.8142	1.3339	-0.1935
7.0000	1.4026	1.4020	0.8185	0.8185	1.3405	-1.3688
7.2000	1.4062	1.4058	0.8236	0.8236	1.3481	-1.8038
7.4000	1.4215	1.4211	0.8325	0.8325	1.3615	1.8400
7.6000	1.4451	1.4444	0.8482	0.8482	1.3851	-0.6824
7.8000	1.4653	1.4646	0.8615	0.8615	1.4050	-0.1373
8.0000	1.4857	1.4852	0.8753	0.8753	1.4256	0.4356
8.2000	1.5090	1.5083	0.8907	0.8907	1.4487	-0.2012
8.4000	1.5223	1.5216	0.8993	0.8994	1.4617	-0.4525
8.6000	1.5232	1.5225	0.8997	0.8998	1.4622	-0.1052
8.8000	1.5193	1.5186	0.8969	0.8969	1.4581	0.0713
9.0000	1.5168	1.5159	0.8951	0.8951	1.4554	-0.0194
9.2000	1.5151	1.5141	0.8938	0.8938	1.4536	0.0918
9.4000	1.5151	1.5141	0.8937	0.8937	1.4536	-0.0149
9.6000	1.5140	1.5141	0.8937	0.8937	1.4536	0.0244
9.8000	1.5147	1.5141	0.8937	0.8937	1.4536	-0.0038
10.0000	1.5144	1.5141	0.8937	0.8937	1.4536	-0.0044

表 4.6 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX GROUND_UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0038
0.2000	-0.0001	0.0011	-0.0146	-0.0147	0.0015	0.0715
0.4000	0.0268	0.0021	-0.0442	-0.0441	0.0047	0.1853
0.6000	0.1174	0.0020	-0.0257	-0.0236	0.0064	-0.5306
0.8000	0.0396	-0.0054	-0.0585	-0.0583	-0.0004	-0.0624
1.0000	-0.0956	-0.0188	-0.0481	-0.0472	-0.0036	0.3186
1.2000	-0.0680	-0.0159	-0.0524	-0.0521	0.0050	-0.3993
1.4000	0.0517	-0.0025	-0.0443	-0.0438	0.0161	-1.9360
1.6000	0.0264	0.0074	-0.0576	-0.0576	0.0158	-0.4380
1.8000	-0.0328	0.0151	-0.0390	-0.0386	0.0277	0.9042
2.0000	0.0548	0.0268	-0.0363	-0.0361	0.0427	3.2238
2.2000	0.0419	0.0562	-0.0258	-0.0256	0.0661	-1.2173
2.4000	0.0823	0.0664	-0.0185	-0.0184	0.0763	-0.0379
2.6000	0.0595	0.0700	-0.0184	-0.0183	0.0794	0.4766
2.8000	0.0860	0.0872	-0.0093	-0.0093	0.0977	1.9818
3.0000	0.1272	0.1328	0.0222	0.0222	0.1431	0.6711
3.2000	0.1781	0.1667	0.0449	0.0449	0.1748	0.4177
3.4000	0.2010	0.2014	0.0711	0.0711	0.2184	0.7499
3.6000	0.2468	0.2478	0.1021	0.1021	0.2647	2.8251
3.8000	0.2973	0.2955	0.1292	0.1293	0.3053	1.8468
4.0000	0.3102	0.3217	0.1506	0.1507	0.3331	-0.3285
4.2000	0.3720	0.3732	0.1840	0.1840	0.3878	-2.9043
4.4000	0.4369	0.4361	0.2275	0.2275	0.4527	-0.4267
4.6000	0.5153	0.5155	0.2819	0.2819	0.5337	1.0030
4.8000	0.5797	0.5864	0.3273	0.3273	0.6005	-0.7743
5.0000	0.6290	0.6422	0.3659	0.3659	0.6544	-0.2494
5.2000	0.7310	0.7213	0.4176	0.4176	0.7336	0.2837
5.4000	0.7954	0.7956	0.4619	0.4619	0.8047	-0.1079
5.6000	0.8936	0.8947	0.5276	0.5276	0.9031	1.7233
5.8000	0.9875	0.9870	0.5850	0.5850	0.9895	-3.8341
6.0000	1.0832	1.0783	0.6482	0.6482	1.0824	0.3171
6.2000	1.1632	1.1607	0.7012	0.7012	1.1631	-0.3812
6.4000	1.2375	1.2378	0.7526	0.7525	1.2410	1.2378
6.6000	1.3067	1.3066	0.7962	0.7962	1.3066	-0.6657
6.8000	1.3369	1.3361	0.8139	0.8138	1.3329	-0.1931
7.0000	1.3421	1.3418	0.8181	0.8180	1.3394	-1.3690
7.2000	1.3492	1.3483	0.8233	0.8232	1.3470	-1.8042
7.4000	1.3620	1.3623	0.8321	0.8319	1.3604	1.8399
7.6000	1.3859	1.3858	0.8476	0.8475	1.3839	-0.6825
7.8000	1.4059	1.4057	0.8609	0.8607	1.4038	-0.1374
8.0000	1.4263	1.4262	0.8747	0.8745	1.4244	0.4356
8.2000	1.4495	1.4493	0.8900	0.8899	1.4474	-0.2012
8.4000	1.4626	1.4623	0.8986	0.8985	1.4604	-0.4524
8.6000	1.4633	1.4629	0.8990	0.8989	1.4609	-0.1052
8.8000	1.4589	1.4587	0.8961	0.8960	1.4568	0.0714
9.0000	1.4562	1.4560	0.8944	0.8942	1.4541	-0.0194
9.2000	1.4544	1.4542	0.8930	0.8929	1.4523	0.0918
9.4000	1.4543	1.4542	0.8929	0.8928	1.4523	-0.0149
9.6000	1.4545	1.4542	0.8929	0.8928	1.4523	0.0244
9.8000	1.4544	1.4542	0.8929	0.8928	1.4523	-0.0038
10.0000	1.4547	1.4542	0.8930	0.8928	1.4523	-0.0044

表 4.7 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0038
0.2000	-0.0001	0.0011	-0.0145	-0.0146	0.0015	0.0715
0.4000	0.0267	0.0021	-0.0443	-0.0442	0.0047	0.1852
0.6000	0.1181	-0.0004	-0.0250	-0.0227	0.0064	-0.5306
0.8000	0.0408	-0.0091	-0.0569	-0.0565	-0.0004	-0.0624
1.0000	-0.1017	-0.0183	-0.0468	-0.0457	-0.0036	0.3185
1.2000	-0.0823	-0.0098	-0.0450	-0.0442	0.0050	-0.3995
1.4000	0.0581	0.0039	-0.0436	-0.0431	0.0161	-1.9362
1.6000	0.0765	0.0051	-0.0383	-0.0376	0.0158	-0.4380
1.8000	-0.0360	0.0168	-0.0364	-0.0359	0.0277	0.9042
2.0000	-0.0213	0.0311	-0.0273	-0.0269	0.0427	3.2238
2.2000	0.1050	0.0551	-0.0124	-0.0120	0.0661	-1.2172
2.4000	0.0949	0.0655	-0.0135	-0.0133	0.0763	-0.0376
2.6000	0.0241	0.0682	-0.0059	-0.0055	0.0794	0.4751
2.8000	0.1037	0.0862	-0.0036	-0.0034	0.0977	1.9816
3.0000	0.1169	0.1317	0.0257	0.0259	0.1431	0.6717
3.2000	0.1842	0.1634	0.0490	0.0492	0.1748	0.4177
3.4000	0.1766	0.2069	0.0817	0.0819	0.2184	0.7498
3.6000	0.2816	0.2532	0.1117	0.1120	0.2647	2.8251
3.8000	0.2860	0.2940	0.1314	0.1316	0.3053	1.8470
4.0000	0.3197	0.3216	0.1480	0.1481	0.3330	-0.3278
4.2000	0.3694	0.3763	0.1859	0.1860	0.3878	-2.9042
4.4000	0.4329	0.4412	0.2296	0.2297	0.4526	-0.4263
4.6000	0.5286	0.5222	0.2828	0.2829	0.5337	1.0028
4.8000	0.5867	0.5890	0.3261	0.3262	0.6005	-0.7759
5.0000	0.6276	0.6427	0.3656	0.3657	0.6544	-0.2493
5.2000	0.7453	0.7214	0.4219	0.4220	0.7336	0.2844
5.4000	0.7728	0.7919	0.4705	0.4707	0.8047	-0.1079
5.6000	0.8906	0.8904	0.5278	0.5278	0.9031	1.7235
5.8000	1.0038	0.9799	0.5973	0.5976	0.9895	-3.8342
6.0000	1.0213	1.0723	0.6656	0.6660	1.0823	0.3172
6.2000	1.1639	1.1530	0.7050	0.7051	1.1630	-0.3814
6.4000	1.2546	1.2305	0.7635	0.7638	1.2409	1.2381
6.6000	1.2891	1.2980	0.8038	0.8040	1.3065	-0.6657
6.8000	1.3545	1.3268	0.8276	0.8279	1.3328	-0.1940
7.0000	1.3116	1.3345	0.8267	0.8268	1.3394	-1.3686
7.2000	1.3452	1.3417	0.8248	0.8249	1.3471	-1.8042
7.4000	1.3619	1.3556	0.8351	0.8352	1.3605	1.8399
7.6000	1.3663	1.3796	0.8548	0.8550	1.3841	-0.6824
7.8000	1.4085	1.3991	0.8678	0.8679	1.4040	-0.1373
8.0000	1.4073	1.4193	0.8806	0.8807	1.4246	0.4356
8.2000	1.4557	1.4426	0.8948	0.8949	1.4477	-0.2012
8.4000	1.4553	1.4554	0.8998	0.8999	1.4607	-0.4524
8.6000	1.4482	1.4562	0.9022	0.9023	1.4613	-0.1052
8.8000	1.4563	1.4521	0.8996	0.8997	1.4572	0.0713
9.0000	1.4503	1.4495	0.8970	0.8971	1.4545	-0.0194
9.2000	1.4485	1.4477	0.8945	0.8946	1.4527	0.0918
9.4000	1.4489	1.4476	0.8947	0.8947	1.4527	-0.0149
9.6000	1.4478	1.4476	0.8939	0.8940	1.4527	0.0244
9.8000	1.4483	1.4478	0.8938	0.8939	1.4527	-0.0038
10.0000	1.4480	1.4478	0.8938	0.8938	1.4527	-0.0044

表 4.8 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0061
0.2000	-0.0001	0.0017	-0.0144	-0.0144	0.0025	0.1144
0.4000	0.0326	-0.0060	-0.0474	-0.0472	0.0075	0.2963
0.6000	0.1053	0.0277	-0.0396	-0.0387	0.0103	-0.8489
0.8000	0.0737	0.0771	-0.0713	-0.0713	-0.0006	-0.1001
1.0000	0.0716	0.0760	-0.0766	-0.0766	-0.0058	0.5097
1.2000	0.0882	0.0883	-0.0696	-0.0696	0.0080	-0.6394
1.4000	0.1048	0.1048	-0.0579	-0.0579	0.0257	-3.0977
1.6000	0.1136	0.1136	-0.0582	-0.0582	0.0253	-0.7007
1.8000	0.1344	0.1344	-0.0455	-0.0455	0.0443	1.4473
2.0000	0.1585	0.1585	-0.0294	-0.0294	0.0684	5.1581
2.2000	0.1919	0.1919	-0.0044	-0.0044	0.1059	-1.9477
2.4000	0.2141	0.2141	0.0065	0.0065	0.1222	-0.0600
2.6000	0.2270	0.2270	0.0097	0.0097	0.1271	0.7599
2.8000	0.2449	0.2449	0.0293	0.0293	0.1564	3.1707
3.0000	0.3049	0.3050	0.0778	0.0778	0.2292	1.0742
3.2000	0.3727	0.3727	0.1116	0.1116	0.2799	0.6682
3.4000	0.4349	0.4349	0.1582	0.1582	0.3498	1.2001
3.6000	0.5209	0.5209	0.2076	0.2076	0.4239	4.5200
3.8000	0.5986	0.5986	0.2510	0.2510	0.4889	2.9551
4.0000	0.6454	0.6454	0.2806	0.2806	0.5334	-0.5261
4.2000	0.7112	0.7113	0.3390	0.3390	0.6210	-4.6467
4.4000	0.8084	0.8084	0.4082	0.4082	0.7248	-0.6821
4.6000	0.9313	0.9312	0.4947	0.4947	0.8546	1.6045
4.8000	1.0458	1.0460	0.5660	0.5660	0.9614	-1.2404
5.0000	1.1450	1.1452	0.6235	0.6235	1.0477	-0.3988
5.2000	1.2714	1.2713	0.7081	0.7081	1.1746	0.4534
5.4000	1.3840	1.3840	0.7839	0.7839	1.2884	-0.1726
5.6000	1.5312	1.5313	0.8890	0.8890	1.4460	2.7572
5.8000	1.6830	1.6828	0.9813	0.9812	1.5843	-6.1347
6.0000	1.8308	1.8307	1.0803	1.0803	1.7329	0.5080
6.2000	1.9670	1.9670	1.1665	1.1665	1.8622	-0.6103
6.4000	2.0895	2.0894	1.2497	1.2497	1.9869	1.9804
6.6000	2.2208	2.2205	1.3197	1.3198	2.0920	-1.0655
6.8000	2.3028	2.3024	1.3477	1.3478	2.1337	-0.3087
7.0000	2.3330	2.3327	1.3548	1.3549	2.1446	-2.1896
7.2000	2.3379	2.3378	1.3630	1.3631	2.1567	-2.8865
7.4000	2.3608	2.3605	1.3772	1.3773	2.1781	2.9439
7.6000	2.3951	2.3949	1.4023	1.4024	2.2156	-1.0919
7.8000	2.4271	2.4269	1.4235	1.4236	2.2474	-0.2198
8.0000	2.4599	2.4596	1.4456	1.4458	2.2804	0.6970
8.2000	2.4975	2.4970	1.4703	1.4705	2.3174	-0.3219
8.4000	2.5188	2.5184	1.4841	1.4843	2.3382	-0.7239
8.6000	2.5202	2.5204	1.4848	1.4850	2.3392	-0.1683
8.8000	2.5125	2.5137	1.4805	1.4807	2.3322	0.1141
9.0000	2.5080	2.5089	1.4777	1.4779	2.3276	-0.0311
9.2000	2.5054	2.5055	1.4756	1.4759	2.3243	0.1469
9.4000	2.5061	2.5055	1.4756	1.4758	2.3243	-0.0238
9.6000	2.5074	2.5055	1.4756	1.4758	2.3243	0.0390
9.8000	2.5074	2.5055	1.4756	1.4758	2.3243	-0.0061
10.0000	2.5061	2.5055	1.4756	1.4758	2.3243	-0.0070

表 4.9 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX GROUND_UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0061
0.2000	-0.0001	0.0018	-0.0140	-0.0141	0.0025	0.1145
0.4000	0.0305	0.0049	-0.0437	-0.0436	0.0075	0.2963
0.6000	0.1333	0.0077	-0.0214	-0.0189	0.0103	-0.8489
0.8000	0.0690	-0.0027	-0.0490	-0.0483	-0.0006	-0.0999
1.0000	-0.0907	-0.0177	-0.0497	-0.0489	-0.0058	0.5096
1.2000	-0.1027	-0.0179	-0.0386	-0.0376	0.0080	-0.6389
1.4000	0.0334	-0.0003	-0.0458	-0.0455	0.0257	-3.0977
1.6000	0.0833	0.0227	-0.0359	-0.0353	0.0253	-0.7006
1.8000	-0.0015	0.0420	-0.0295	-0.0291	0.0443	1.4470
2.0000	0.0412	0.0547	-0.0248	-0.0247	0.0683	5.1581
2.2000	0.1184	0.1048	0.0003	0.0005	0.1058	-1.9474
2.4000	0.1274	0.1225	0.0082	0.0083	0.1221	-0.0603
2.6000	0.1344	0.1288	0.0118	0.0118	0.1270	0.7620
2.8000	0.1197	0.1543	0.0410	0.0412	0.1563	3.1707
3.0000	0.2276	0.2145	0.0823	0.0824	0.2290	1.0747
3.2000	0.2640	0.2673	0.1125	0.1126	0.2796	0.6682
3.4000	0.3381	0.3368	0.1585	0.1586	0.3495	1.1998
3.6000	0.4274	0.4228	0.2090	0.2090	0.4236	4.5199
3.8000	0.5023	0.4864	0.2563	0.2563	0.4886	2.9551
4.0000	0.5291	0.5299	0.2807	0.2807	0.5330	-0.5270
4.2000	0.5951	0.6088	0.3438	0.3439	0.6206	-4.6469
4.4000	0.7109	0.7123	0.4085	0.4085	0.7243	-0.6815
4.6000	0.8454	0.8381	0.4968	0.4968	0.8541	1.6046
4.8000	0.9479	0.9489	0.5661	0.5661	0.9609	-1.2409
5.0000	1.0440	1.0453	0.6237	0.6237	1.0471	-0.3990
5.2000	1.1769	1.1765	0.7079	0.7079	1.1740	0.4542
5.4000	1.2849	1.2868	0.7844	0.7844	1.2877	-0.1726
5.6000	1.4438	1.4445	0.8889	0.8889	1.4453	2.7577
5.8000	1.5949	1.5959	0.9814	0.9814	1.5836	-6.1345
6.0000	1.7395	1.7467	1.0856	1.0856	1.7321	0.5082
6.2000	1.8895	1.8853	1.1702	1.1702	1.8614	-0.6103
6.4000	2.0116	2.0102	1.2500	1.2500	1.9860	1.9808
6.6000	2.1269	2.1273	1.3195	1.3195	2.0910	-1.0659
6.8000	2.1837	2.1804	1.3483	1.3483	2.1328	-0.3101
7.0000	2.1955	2.1958	1.3545	1.3545	2.1437	-2.1898
7.2000	2.2010	2.2010	1.3626	1.3626	2.1558	-2.8863
7.4000	2.2212	2.2225	1.3774	1.3774	2.1772	2.9441
7.6000	2.2556	2.2570	1.4027	1.4027	2.2147	-1.0919
7.8000	2.2909	2.2886	1.4236	1.4236	2.2465	-0.2198
8.0000	2.3219	2.3210	1.4453	1.4452	2.2795	0.6970
8.2000	2.3588	2.3580	1.4698	1.4697	2.3164	-0.3219
8.4000	2.3802	2.3790	1.4836	1.4835	2.3372	-0.7239
8.6000	2.3814	2.3802	1.4842	1.4842	2.3382	-0.1683
8.8000	2.3740	2.3732	1.4800	1.4799	2.3313	0.1141
9.0000	2.3702	2.3686	1.4771	1.4771	2.3267	-0.0311
9.2000	2.3666	2.3652	1.4751	1.4750	2.3233	0.1469
9.4000	2.3666	2.3652	1.4750	1.4750	2.3233	-0.0238
9.6000	2.3671	2.3652	1.4751	1.4750	2.3233	0.0390
9.8000	2.3667	2.3652	1.4751	1.4750	2.3233	-0.0061
10.0000	2.3668	2.3652	1.4751	1.4750	2.3233	-0.0070

表 4.10 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0061
0.2000	-0.0001	0.0018	-0.0139	-0.0140	0.0025	0.1144
0.4000	0.0304	0.0049	-0.0438	-0.0437	0.0075	0.2964
0.6000	0.1340	0.0057	-0.0206	-0.0180	0.0103	-0.8489
0.8000	0.0702	-0.0057	-0.0475	-0.0467	-0.0006	-0.1000
1.0000	-0.0926	-0.0173	-0.0469	-0.0460	-0.0058	0.5097
1.2000	-0.1142	-0.0051	-0.0300	-0.0282	0.0080	-0.6387
1.4000	0.0261	0.0133	-0.0506	-0.0505	0.0257	-3.0978
1.6000	0.1274	0.0218	-0.0195	-0.0178	0.0253	-0.7005
1.8000	0.0561	0.0409	-0.0401	-0.0400	0.0443	1.4474
2.0000	-0.0219	0.0625	0.0021	0.0034	0.0683	5.1582
2.2000	0.0633	0.0986	0.0084	0.0086	0.1058	-1.9478
2.4000	0.2041	0.1172	0.0383	0.0396	0.1221	-0.0602
2.6000	0.1856	0.1266	0.0313	0.0319	0.1270	0.7602
2.8000	0.0601	0.1532	0.0640	0.0655	0.1562	3.1706
3.0000	0.0724	0.2236	0.1316	0.1352	0.2289	1.0746
3.2000	0.2442	0.2746	0.1225	0.1226	0.2795	0.6682
3.4000	0.4207	0.3433	0.1871	0.1882	0.3493	1.1998
3.6000	0.4341	0.4184	0.2128	0.2130	0.4232	4.5201
3.8000	0.4230	0.4846	0.2732	0.2740	0.4882	2.9544
4.0000	0.5445	0.5282	0.2858	0.2860	0.5325	-0.5255
4.2000	0.5826	0.6167	0.3508	0.3511	0.6199	-4.6467
4.4000	0.7171	0.7202	0.4092	0.4094	0.7236	-0.6827
4.6000	0.8474	0.8498	0.4952	0.4954	0.8531	1.6051
4.8000	0.9559	0.9566	0.5659	0.5660	0.9597	-1.2404
5.0000	1.0316	1.0424	0.6258	0.6259	1.0459	-0.3984
5.2000	1.1917	1.1695	0.7149	0.7150	1.1725	0.4536
5.4000	1.2594	1.2828	0.7919	0.7921	1.2862	-0.1726
5.6000	1.3981	1.4395	0.9030	0.9034	1.4436	2.7566
5.8000	1.6280	1.5798	0.9971	0.9975	1.5817	-6.1345
6.0000	1.7052	1.7332	1.0895	1.0897	1.7300	0.5078
6.2000	1.8609	1.8624	1.1657	1.1658	1.8591	-0.6099
6.4000	2.0011	1.9870	1.2525	1.2526	1.9836	1.9804
6.6000	2.0914	2.0911	1.3183	1.3183	2.0884	-1.0651
6.8000	2.1875	2.1383	1.3624	1.3627	2.1302	-0.3089
7.0000	2.1299	2.1495	1.3606	1.3607	2.1411	-2.1904
7.2000	2.1458	2.1609	1.3659	1.3660	2.1532	-2.8867
7.4000	2.2128	2.1826	1.3839	1.3841	2.1745	2.9437
7.6000	2.1849	2.2201	1.4100	1.4103	2.2120	-1.0920
7.8000	2.2747	2.2516	1.4283	1.4285	2.2438	-0.2199
8.0000	2.2689	2.2844	1.4488	1.4490	2.2767	0.6970
8.2000	2.3370	2.3213	1.4728	1.4729	2.3136	-0.3219
8.4000	2.3420	2.3419	1.4829	1.4830	2.3344	-0.7239
8.6000	2.3370	2.3428	1.4848	1.4849	2.3355	-0.1683
8.8000	2.3436	2.3359	1.4807	1.4809	2.3285	0.1142
9.0000	2.3368	2.3312	1.4774	1.4776	2.3239	-0.0311
9.2000	2.3302	2.3279	1.4745	1.4746	2.3206	0.1469
9.4000	2.3302	2.3282	1.4743	1.4744	2.3206	-0.0238
9.6000	2.3277	2.3283	1.4740	1.4741	2.3206	0.0390
9.8000	2.3279	2.3284	1.4740	1.4741	2.3206	-0.0061
10.0000	2.3282	2.3284	1.4740	1.4741	2.3206	-0.0070

表 4.11 HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX GROUND_UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0077
0.2000	-0.0001	0.0021	-0.0139	-0.0140	0.0031	0.1430
0.4000	0.0347	-0.0072	-0.0480	-0.0478	0.0094	0.3706
0.6000	0.1053	0.0288	-0.0382	-0.0374	0.0128	-1.0613
0.8000	0.0738	0.0768	-0.0716	-0.0716	-0.0008	-0.1249
1.0000	0.0678	0.0734	-0.0778	-0.0778	-0.0072	0.6371
1.2000	0.0835	0.0835	-0.0683	-0.0683	0.0100	-0.7990
1.4000	0.1039	0.1039	-0.0536	-0.0536	0.0321	-3.8724
1.6000	0.1150	0.1150	-0.0539	-0.0539	0.0316	-0.8756
1.8000	0.1401	0.1401	-0.0381	-0.0381	0.0554	1.8095
2.0000	0.1698	0.1698	-0.0180	-0.0180	0.0855	6.4477
2.2000	0.2105	0.2105	0.0133	0.0133	0.1324	-2.4342
2.4000	0.2384	0.2384	0.0268	0.0269	0.1528	-0.0752
2.6000	0.2557	0.2557	0.0309	0.0309	0.1589	0.9512
2.8000	0.2767	0.2768	0.0553	0.0553	0.1955	3.9632
3.0000	0.3479	0.3479	0.1160	0.1160	0.2865	1.3422
3.2000	0.4341	0.4341	0.1582	0.1583	0.3499	0.8354
3.4000	0.5080	0.5080	0.2165	0.2165	0.4373	1.4997
3.6000	0.6148	0.6148	0.2782	0.2782	0.5298	5.6500
3.8000	0.7142	0.7142	0.3325	0.3325	0.6112	3.6932
4.0000	0.7809	0.7810	0.3695	0.3695	0.6667	-0.6593
4.2000	0.8641	0.8642	0.4425	0.4425	0.7762	-5.8085
4.4000	0.9819	0.9819	0.5290	0.5290	0.9060	-0.8542
4.6000	1.1301	1.1301	0.6372	0.6372	1.0682	2.0062
4.8000	1.2748	1.2749	0.7262	0.7262	1.2018	-1.5507
5.0000	1.4017	1.4019	0.7981	0.7981	1.3097	-0.4979
5.2000	1.5562	1.5564	0.9038	0.9038	1.4682	0.5681
5.4000	1.6974	1.6976	0.9986	0.9986	1.6105	-0.2157
5.6000	1.8750	1.8751	1.1299	1.1300	1.8075	3.4459
5.8000	2.0649	2.0649	1.2451	1.2453	1.9804	-7.6678
6.0000	2.2498	2.2499	1.3689	1.3691	2.1662	0.6352
6.2000	2.4229	2.4230	1.4767	1.4769	2.3278	-0.7623
6.4000	2.5771	2.5772	1.5807	1.5809	2.4837	2.4755
6.6000	2.7435	2.7436	1.6682	1.6684	2.6150	-1.3314
6.8000	2.8621	2.8626	1.7032	1.7034	2.6676	-0.3878
7.0000	2.9275	2.9280	1.7119	1.7121	2.6808	-2.7368
7.2000	2.9521	2.9523	1.7220	1.7222	2.6961	-3.6078
7.4000	2.9814	2.9816	1.7398	1.7400	2.7230	3.6800
7.6000	3.0239	3.0238	1.7713	1.7715	2.7701	-1.3648
7.8000	3.0642	3.0640	1.7979	1.7981	2.8099	-0.2747
8.0000	3.1052	3.1049	1.8256	1.8258	2.8511	0.8712
8.2000	3.1520	3.1518	1.8563	1.8565	2.8972	-0.4023
8.4000	3.1785	3.1781	1.8736	1.8738	2.9232	-0.9049
8.6000	3.1804	3.1804	1.8745	1.8747	2.9244	-0.2103
8.8000	3.1728	3.1723	1.8687	1.8689	2.9161	0.1427
9.0000	3.1683	3.1669	1.8653	1.8655	2.9107	-0.0389
9.2000	3.1649	3.1633	1.8626	1.8628	2.9072	0.1836
9.4000	3.1635	3.1632	1.8625	1.8627	2.9072	-0.0298
9.6000	3.1660	3.1632	1.8625	1.8627	2.9072	0.0487
9.8000	3.1642	3.1632	1.8625	1.8627	2.9072	-0.0076
10.0000	3.1656	3.1632	1.8625	1.8627	2.9072	-0.0087

表 4.12 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0077
0.2000	-0.0002	0.0022	-0.0136	-0.0136	0.0031	0.1430
0.4000	0.0318	0.0071	-0.0430	-0.0429	0.0094	0.3706
0.6000	0.1375	0.0121	-0.0187	-0.0162	0.0128	-1.0612
0.8000	0.0785	-0.0001	-0.0466	-0.0457	-0.0008	-0.1250
1.0000	-0.0866	-0.0164	-0.0511	-0.0503	-0.0072	0.6372
1.2000	-0.1104	-0.0177	-0.0344	-0.0332	0.0100	-0.7985
1.4000	0.0222	0.0009	-0.0432	-0.0431	0.0321	-3.8728
1.6000	0.0980	0.0279	-0.0282	-0.0275	0.0316	-0.8758
1.8000	0.0197	0.0525	-0.0258	-0.0256	0.0553	1.8095
2.0000	0.0491	0.0657	-0.0123	-0.0122	0.0854	6.4477
2.2000	0.1314	0.1278	0.0147	0.0148	0.1323	-2.4347
2.4000	0.1512	0.1492	0.0276	0.0277	0.1526	-0.0750
2.6000	0.1740	0.1670	0.0333	0.0334	0.1587	0.9499
2.8000	0.1848	0.1998	0.0606	0.0607	0.1953	3.9633
3.0000	0.2772	0.2824	0.1177	0.1177	0.2862	1.3434
3.2000	0.3723	0.3592	0.1628	0.1629	0.3495	0.8353
3.4000	0.4175	0.4285	0.2202	0.2202	0.4369	1.5000
3.6000	0.5332	0.5326	0.2783	0.2783	0.5293	5.6500
3.8000	0.6393	0.6204	0.3390	0.3391	0.6106	3.6930
4.0000	0.6745	0.6761	0.3697	0.3697	0.6661	-0.6559
4.2000	0.7561	0.7695	0.4470	0.4471	0.7755	-5.8084
4.4000	0.8990	0.8991	0.5292	0.5292	0.9052	-0.8541
4.6000	1.0646	1.0611	0.6377	0.6378	1.0674	2.0059
4.8000	1.1974	1.2018	0.7270	0.7271	1.2009	-1.5513
5.0000	1.3023	1.3211	0.8036	0.8036	1.3087	-0.4988
5.2000	1.4728	1.4602	0.9079	0.9079	1.4671	0.5670
5.4000	1.5842	1.6051	1.0056	1.0057	1.6092	-0.2158
5.6000	1.7633	1.7820	1.1357	1.1358	1.8060	3.4459
5.8000	2.0043	1.9773	1.2541	1.2542	1.9787	-7.6679
6.0000	2.1444	2.1722	1.3783	1.3785	2.1643	0.6337
6.2000	2.3731	2.3413	1.4874	1.4876	2.3259	-0.7626
6.4000	2.4788	2.5003	1.5875	1.5876	2.4816	2.4762
6.6000	2.6542	2.6294	1.6765	1.6767	2.6128	-1.3311
6.8000	2.7391	2.7290	1.7057	1.7057	2.6655	-0.3865
7.0000	2.7582	2.7585	1.7114	1.7114	2.6789	-2.7377
7.2000	2.7506	2.7646	1.7266	1.7267	2.6943	-3.6081
7.4000	2.8028	2.7960	1.7426	1.7427	2.7213	3.6801
7.6000	2.8431	2.8438	1.7712	1.7713	2.7685	-1.3648
7.8000	2.8816	2.8844	1.8002	1.8003	2.8084	-0.2749
8.0000	2.9314	2.9251	1.8279	1.8280	2.8497	0.8712
8.2000	2.9739	2.9717	1.8580	1.8581	2.8959	-0.4023
8.4000	2.9976	2.9988	1.8742	1.8743	2.9220	-0.9049
8.6000	2.9999	3.0015	1.8754	1.8755	2.9234	-0.2104
8.8000	2.9938	2.9935	1.8688	1.8689	2.9152	0.1426
9.0000	2.9883	2.9881	1.8653	1.8653	2.9099	-0.0388
9.2000	2.9850	2.9847	1.8626	1.8626	2.9064	0.1836
9.4000	2.9844	2.9847	1.8626	1.8626	2.9064	-0.0298
9.6000	2.9839	2.9847	1.8626	1.8625	2.9064	0.0487
9.8000	2.9839	2.9847	1.8625	1.8625	2.9064	-0.0076
10.0000	2.9843	2.9847	1.8625	1.8625	2.9064	-0.0087

表 4.13 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析歷時記錄

TIME	49 UX BODY_UXT	5 UX BODY_UXB	49 UZ BODY_UZT	5 UZ BODY_UZB	3 UX	3 AX GROUND_UX
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0077
0.2000	-0.0002	0.0022	-0.0135	-0.0135	0.0031	0.1431
0.4000	0.0316	0.0071	-0.0431	-0.0430	0.0094	0.3706
0.6000	0.1381	0.0102	-0.0179	-0.0153	0.0128	-1.0614
0.8000	0.0797	-0.0033	-0.0450	-0.0441	-0.0008	-0.1250
1.0000	-0.0891	-0.0166	-0.0496	-0.0487	-0.0072	0.6371
1.2000	-0.1223	-0.0010	-0.0244	-0.0222	0.0100	-0.7987
1.4000	0.0091	0.0214	-0.0491	-0.0491	0.0321	-3.8720
1.6000	0.1326	0.0284	-0.0159	-0.0142	0.0316	-0.8757
1.8000	0.0803	0.0522	-0.0279	-0.0278	0.0553	1.8092
2.0000	-0.0092	0.0828	0.0154	0.0168	0.0854	6.4476
2.2000	0.0694	0.1296	0.0353	0.0359	0.1323	-2.4342
2.4000	0.2390	0.1536	0.0581	0.0594	0.1527	-0.0751
2.6000	0.2623	0.1697	0.0645	0.0659	0.1588	0.9525
2.8000	0.1403	0.2038	0.0795	0.0803	0.1954	3.9635
3.0000	0.1272	0.2920	0.1748	0.1793	0.2863	1.3431
3.2000	0.2706	0.3549	0.1887	0.1898	0.3496	0.8352
3.4000	0.5075	0.4413	0.2411	0.2420	0.4369	1.4998
3.6000	0.6039	0.5393	0.3014	0.3021	0.5294	5.6499
3.8000	0.5865	0.6284	0.3480	0.3485	0.6106	3.6930
4.0000	0.6857	0.6840	0.3705	0.3707	0.6661	-0.6559
4.2000	0.7667	0.7952	0.4524	0.4526	0.7755	-5.8085
4.4000	0.9428	0.9250	0.5349	0.5351	0.9051	-0.8539
4.6000	1.0668	1.0876	0.6438	0.6440	1.0671	2.0064
4.8000	1.2495	1.2214	0.7356	0.7358	1.2005	-1.5492
5.0000	1.3096	1.3383	0.8077	0.8079	1.3083	-0.4985
5.2000	1.4489	1.4965	0.9201	0.9205	1.4665	0.5687
5.4000	1.6785	1.6388	1.0119	1.0123	1.6086	-0.2158
5.6000	1.7889	1.8363	1.1458	1.1463	1.8053	3.4462
5.8000	2.0326	2.0170	1.2494	1.2495	1.9779	-7.6679
6.0000	2.2235	2.2111	1.3719	1.3721	2.1634	0.6346
6.2000	2.3712	2.3720	1.4759	1.4760	2.3248	-0.7625
6.4000	2.5143	2.5275	1.5836	1.5837	2.4805	2.4762
6.6000	2.6947	2.6600	1.6782	1.6785	2.6116	-1.3314
6.8000	2.7639	2.7219	1.7163	1.7166	2.6642	-0.3860
7.0000	2.7046	2.7376	1.7211	1.7214	2.6775	-2.7379
7.2000	2.7557	2.7525	1.7216	1.7217	2.6929	-3.6085
7.4000	2.7925	2.7794	1.7428	1.7430	2.7198	3.6797
7.6000	2.7882	2.8258	1.7828	1.7830	2.7669	-1.3650
7.8000	2.8997	2.8658	1.8066	1.8068	2.8067	-0.2749
8.0000	2.8839	2.9070	1.8316	1.8317	2.8479	0.8712
8.2000	2.9722	2.9532	1.8612	1.8614	2.8940	-0.4023
8.4000	2.9839	2.9796	1.8737	1.8738	2.9201	-0.9048
8.6000	2.9872	2.9808	1.8749	1.8750	2.9214	-0.2104
8.8000	2.9643	2.9729	1.8699	1.8700	2.9132	0.1427
9.0000	2.9783	2.9675	1.8672	1.8672	2.9078	-0.0388
9.2000	2.9607	2.9641	1.8623	1.8623	2.9043	0.1836
9.4000	2.9582	2.9642	1.8629	1.8630	2.9043	-0.0298
9.6000	2.9602	2.9642	1.8623	1.8624	2.9043	0.0487
9.8000	2.9644	2.9641	1.8613	1.8614	2.9043	-0.0076
10.0000	2.9640	2.9639	1.8612	1.8613	2.9043	-0.0087

表 4.14 HI-STORM 100[®] 貯存設施在各種條件下的滑動和翻覆情形

Horizontal Earthquake Acceleration	Type	Coefficient of Friction		
		0.2	0.4	0.6
0.3 g	Sliding	Yes	Yes	Yes
	Overturning	No	No	No
	ΔX (mm)	67	44	23
	θ (deg)	0.70	0.78	0.85
0.5 g	Sliding	Yes	Yes	Yes
	Overturning	No	No	No
	ΔX (mm)	92	60	31
	θ (deg)	0.93	1.09	1.17
0.8 g	Sliding	Yes	Yes	Yes
	Overturning	No	No	No
	ΔX (mm)	275	79	48
	θ (deg)	0.97	1.20	1.47
1.0 g	Sliding	Yes	Yes	Yes
	Overturning	No	No	No
	ΔX (mm)	378	115	85
	θ (deg)	1.05	1.21	1.59

ΔX : Maximum sliding distance

θ : Maximum wavered angle

表 6.1 在最終條例有效日起即以後的乾罐式貯存之 ISFSI 或 MRS

特殊執照申請者之設計地震地表運動

場址狀態	特定執照申請者
其廠址位於美國西區及美國東區的已知已知地震活躍區域且其位置不與核能電廠位於相同廠址時。	必須使用地震危害度分析或適當的敏感度分析以計算地震危害評估的不準度。
其廠址位於美國西區及美國東區的已知地震活躍區域且其位置與核能電廠位於相同廠址時。	使用地震危害度分析或適當的敏感度分析以計算地震危害評估的不準度。 或 現行核能電廠設計準則(多機組場址使用及與最近核能電廠的設計準則).
其廠址不位於美國東區的已知地震活躍區域	使用地震危害度分析或適當的敏感度分析以計算地震危害評估的不準度 或 現行核能電廠設計準則(多機組場址使用及與最近核能電廠的設計準則) 或 合適的反應譜錨定在0.25g (subject to the conditions in new § 72.103(a)(1))。

1 新§ 72.103設不適用於通用執照，通用執照必須符合聯辦法規第10章 72.212的條件。

2 在美國大陸，無論其地質調查的結果為何，其設計地震其水平設計地震反應譜，不得小於0.10 g。



圖 2. 1HI-STORM 100[®] 貯存情形(取自 Holtec SUMMARY8)

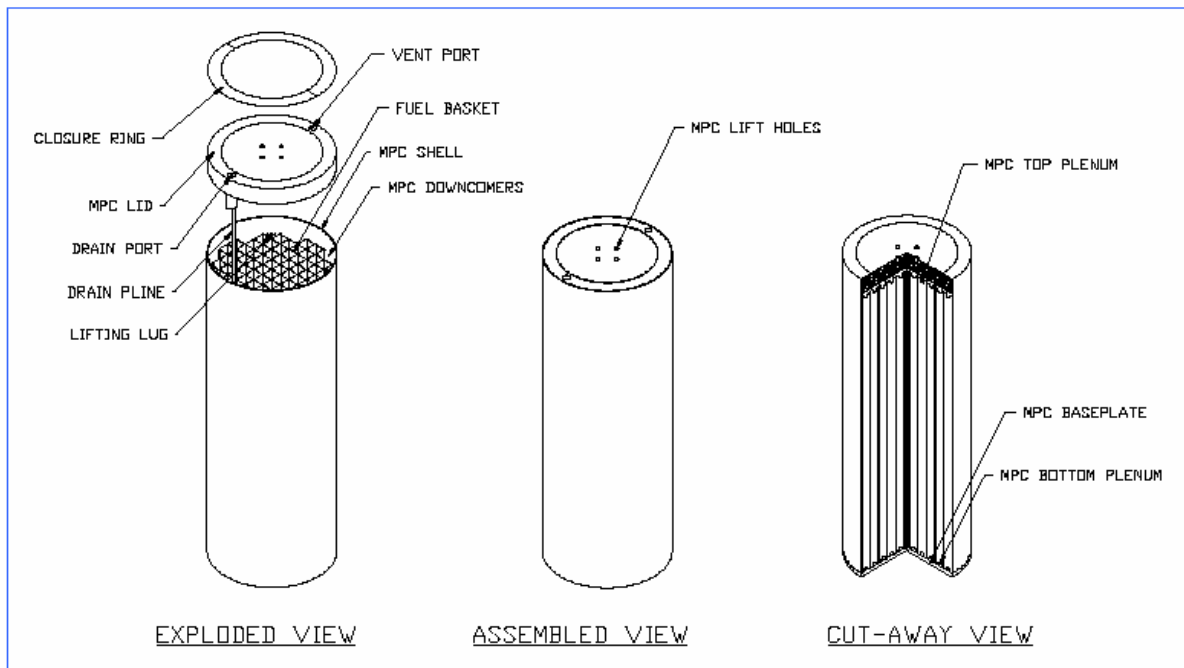
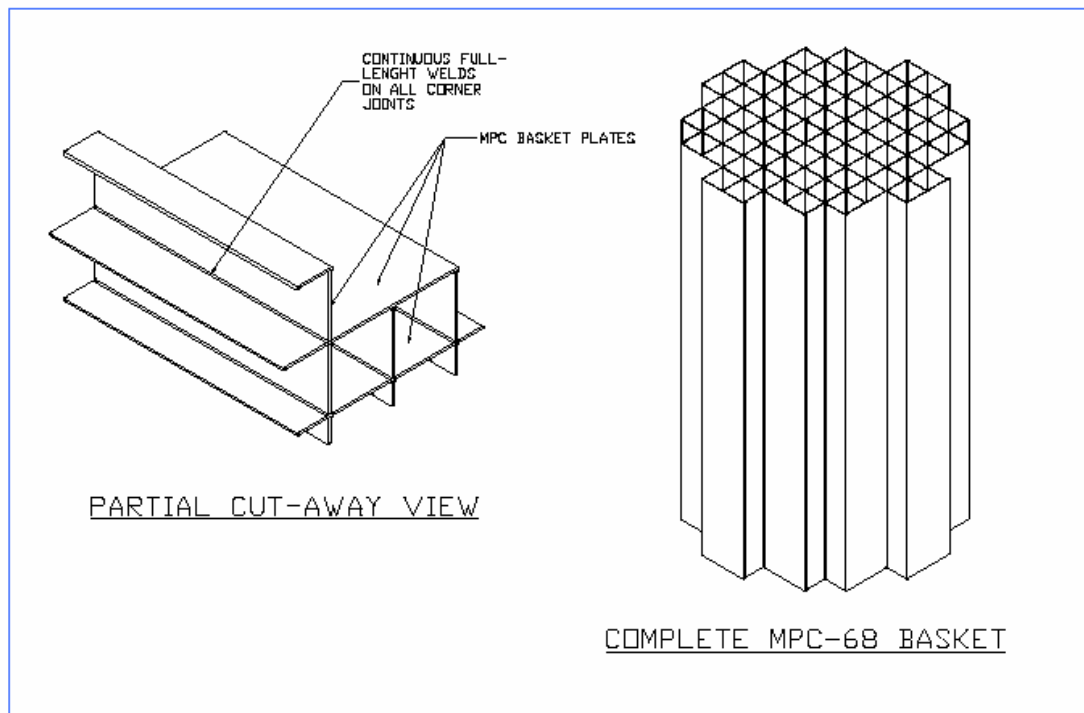


圖 2.2 MPC 構造示意圖(取自 Holtec SUMMARY8)

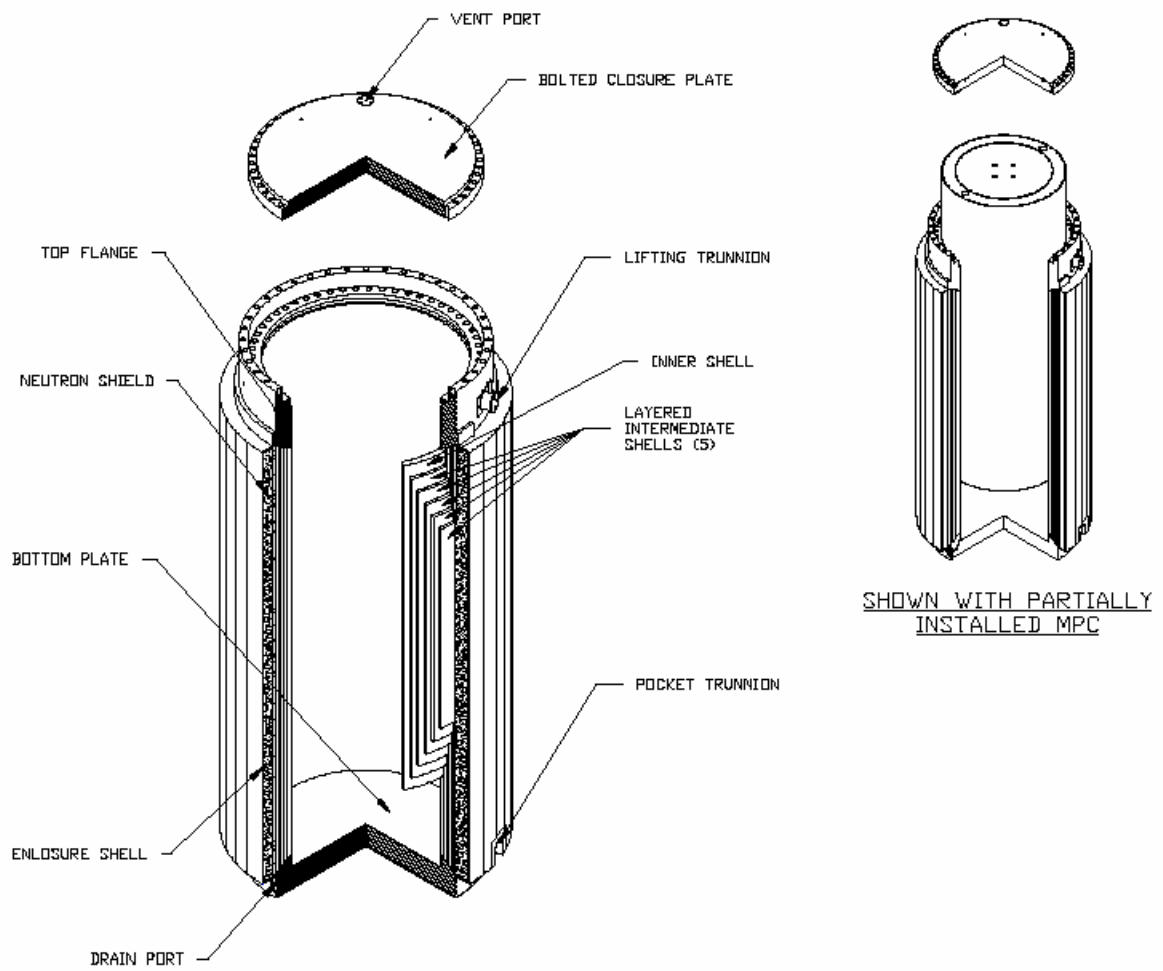


圖 2.3 HI-STORM 100[®]防護層剖面示意圖(取自 Holtec SUMMARY8)



圖 2.4 HI-TRAC 實體圖(取自 Holtec SUMMARY8)

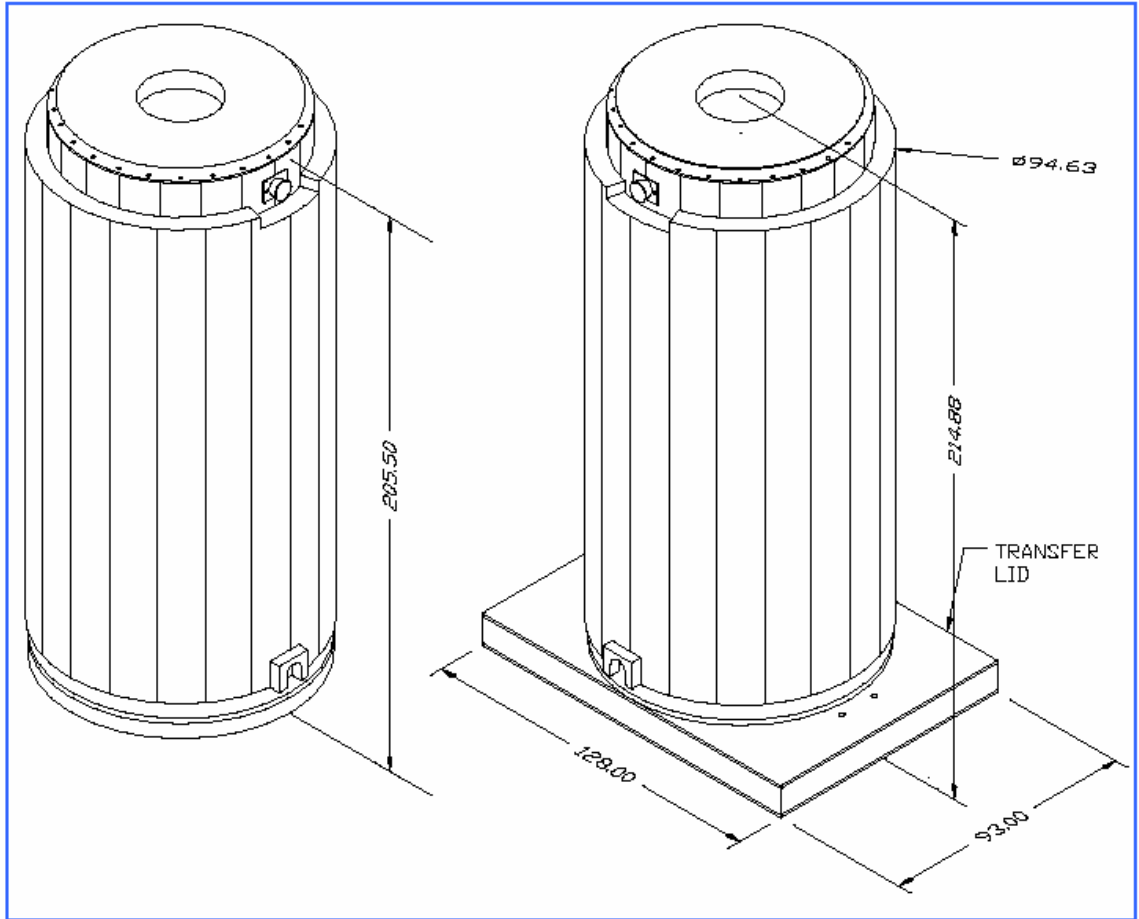


圖 2.5 HI-TRAC[®] 構造示意圖(取自 Holtec SUMMARY8)

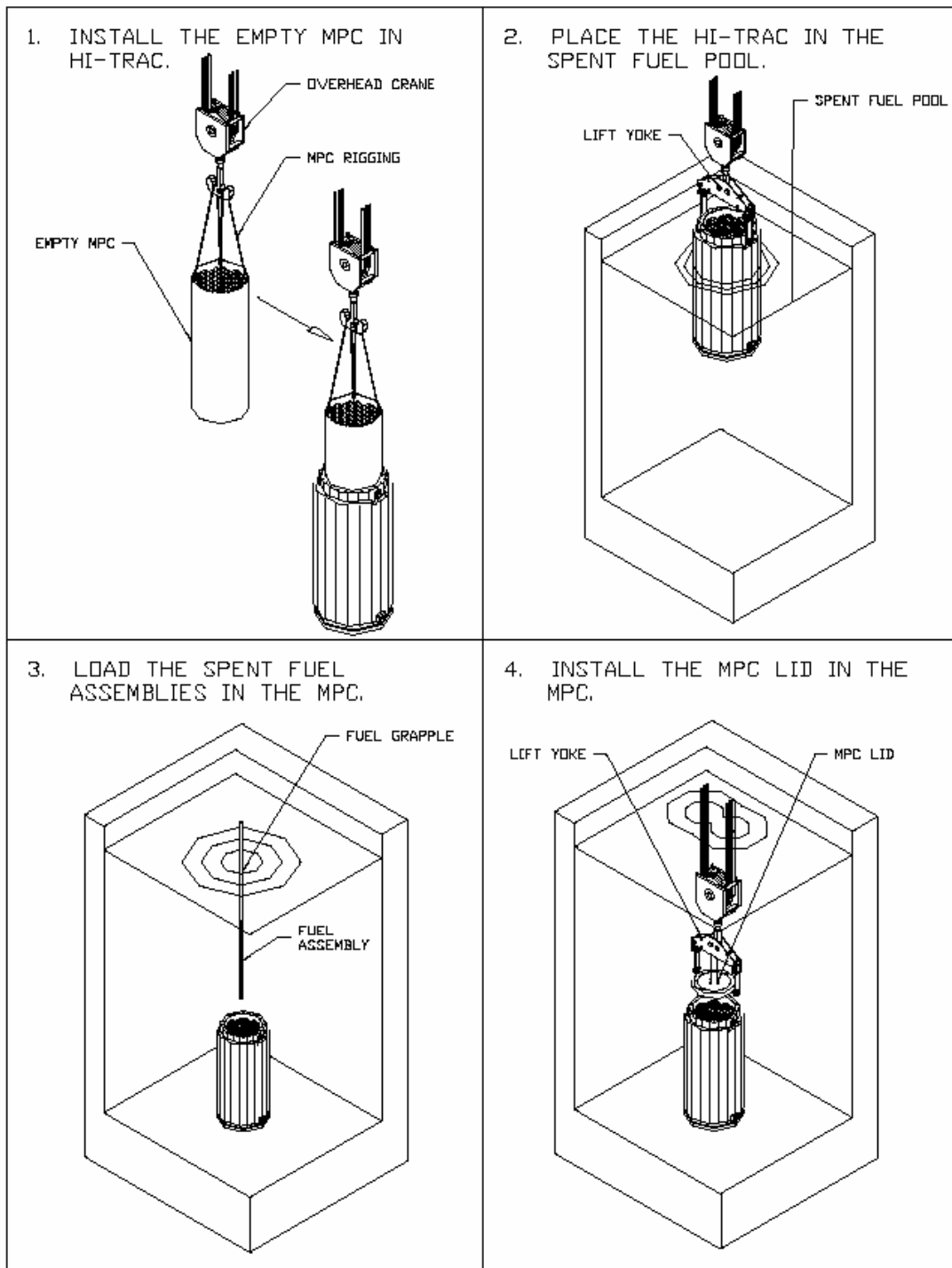


圖 2.6 HI-STORM 100[®] 操作示意圖(1)(取自 Holtec SUMMARY8)

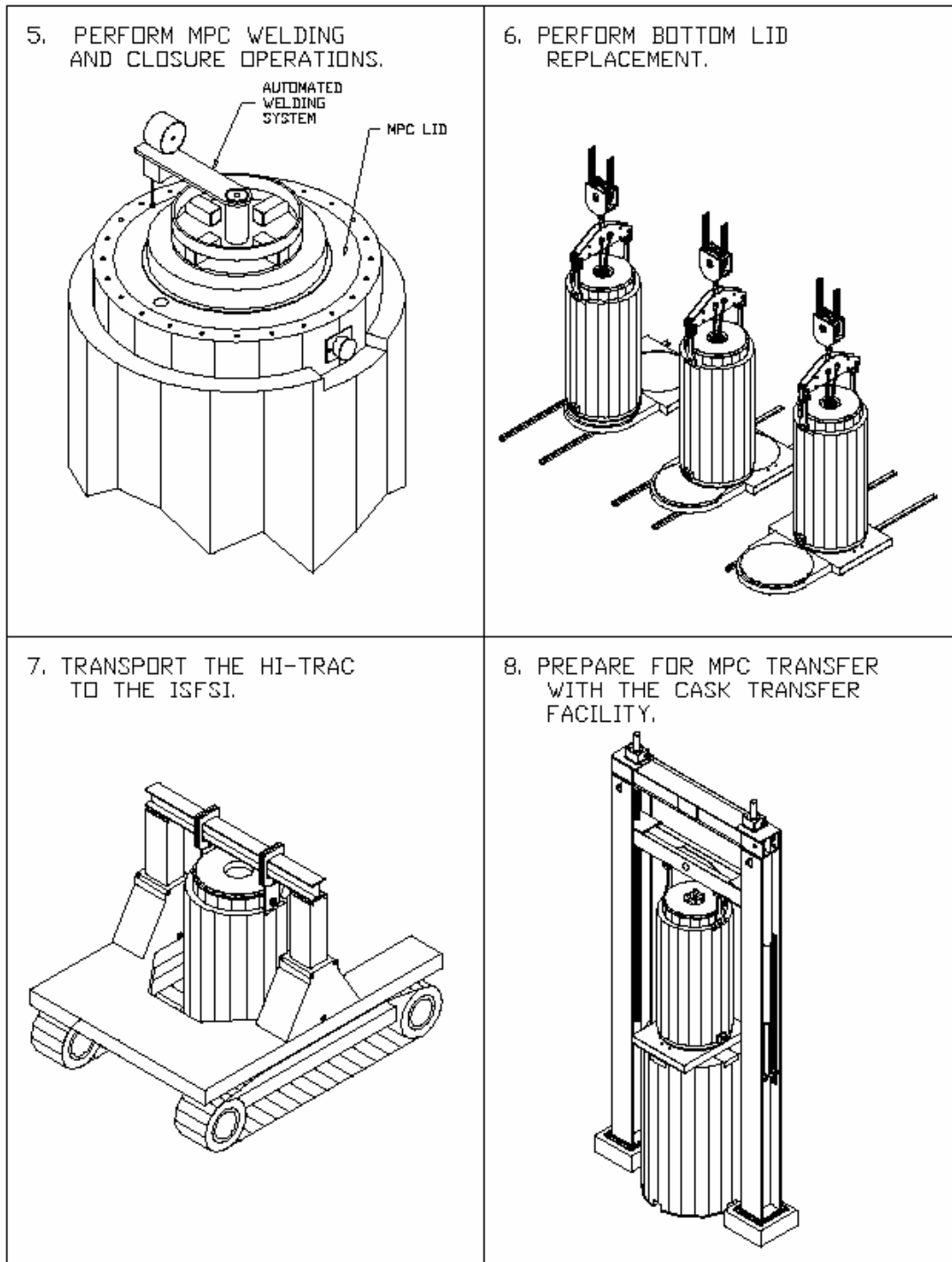


圖 2.7 HI-STORM 100[®] 操作示意圖(2)(取自 Holtec SUMMARY8)

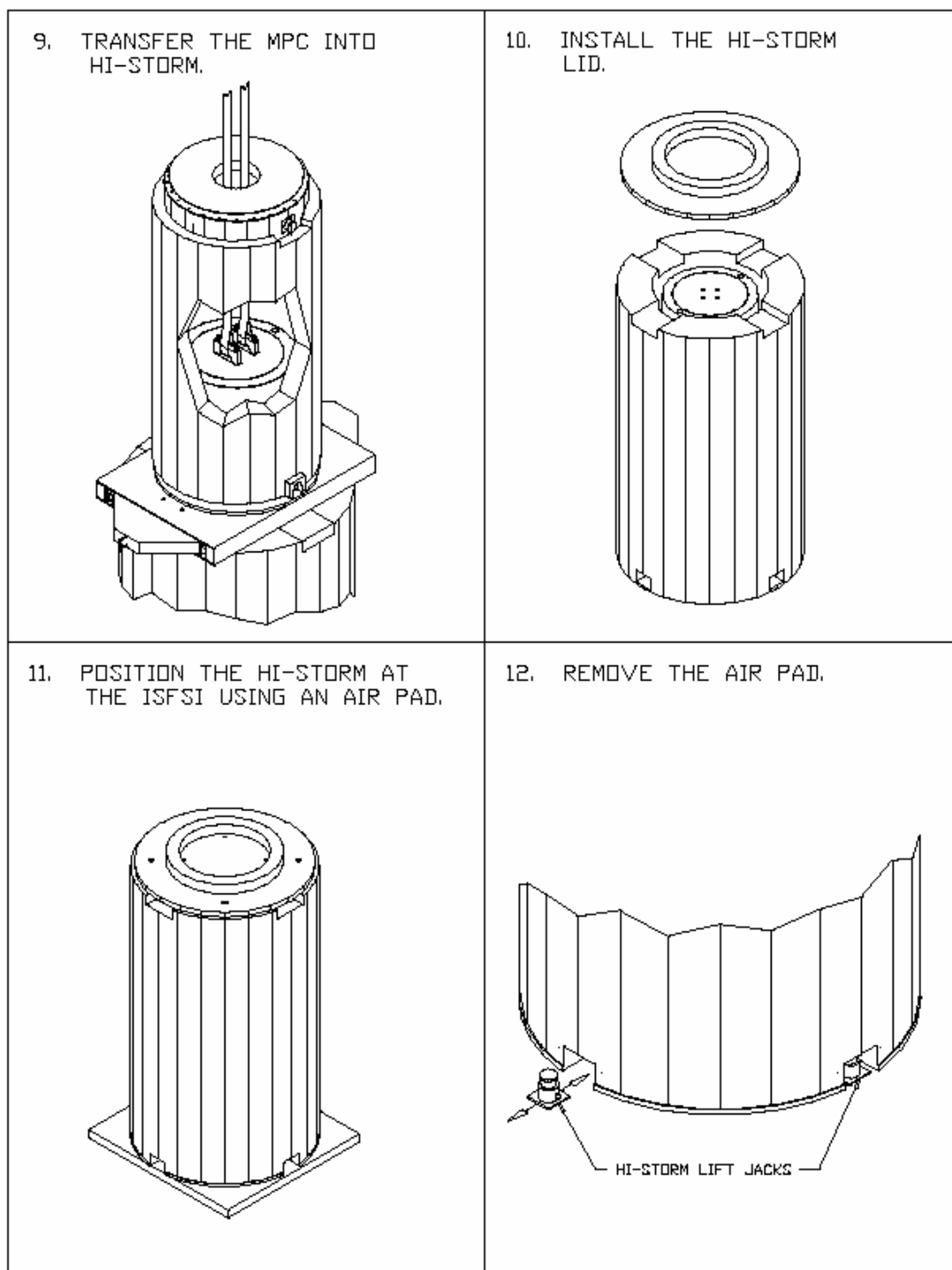


圖 2.8 HI-STORM 100[®] 操作示意圖(3)(取自 Holtec SUMMARY8)

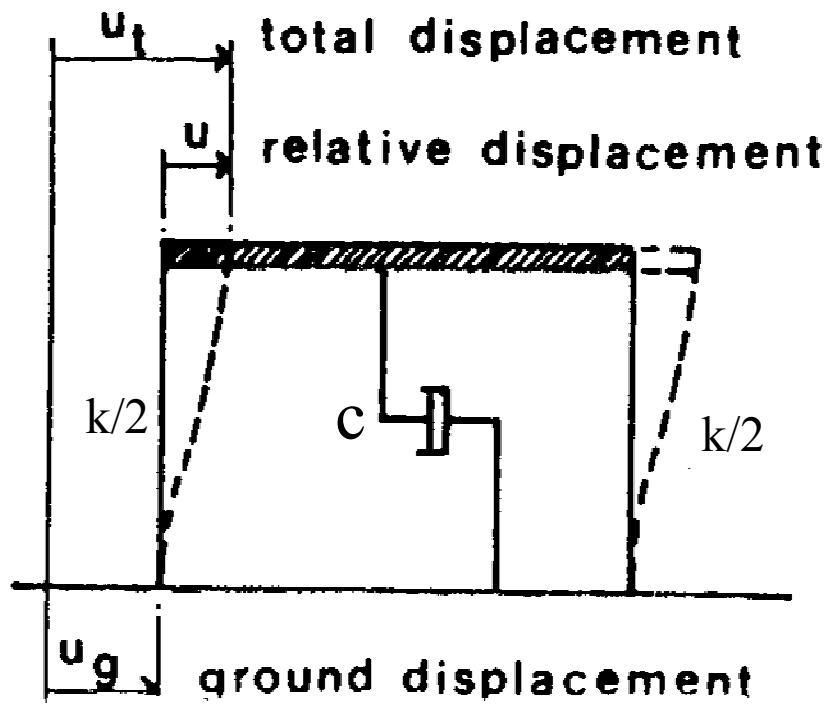


圖 2.9 理想單自由度系統示意圖

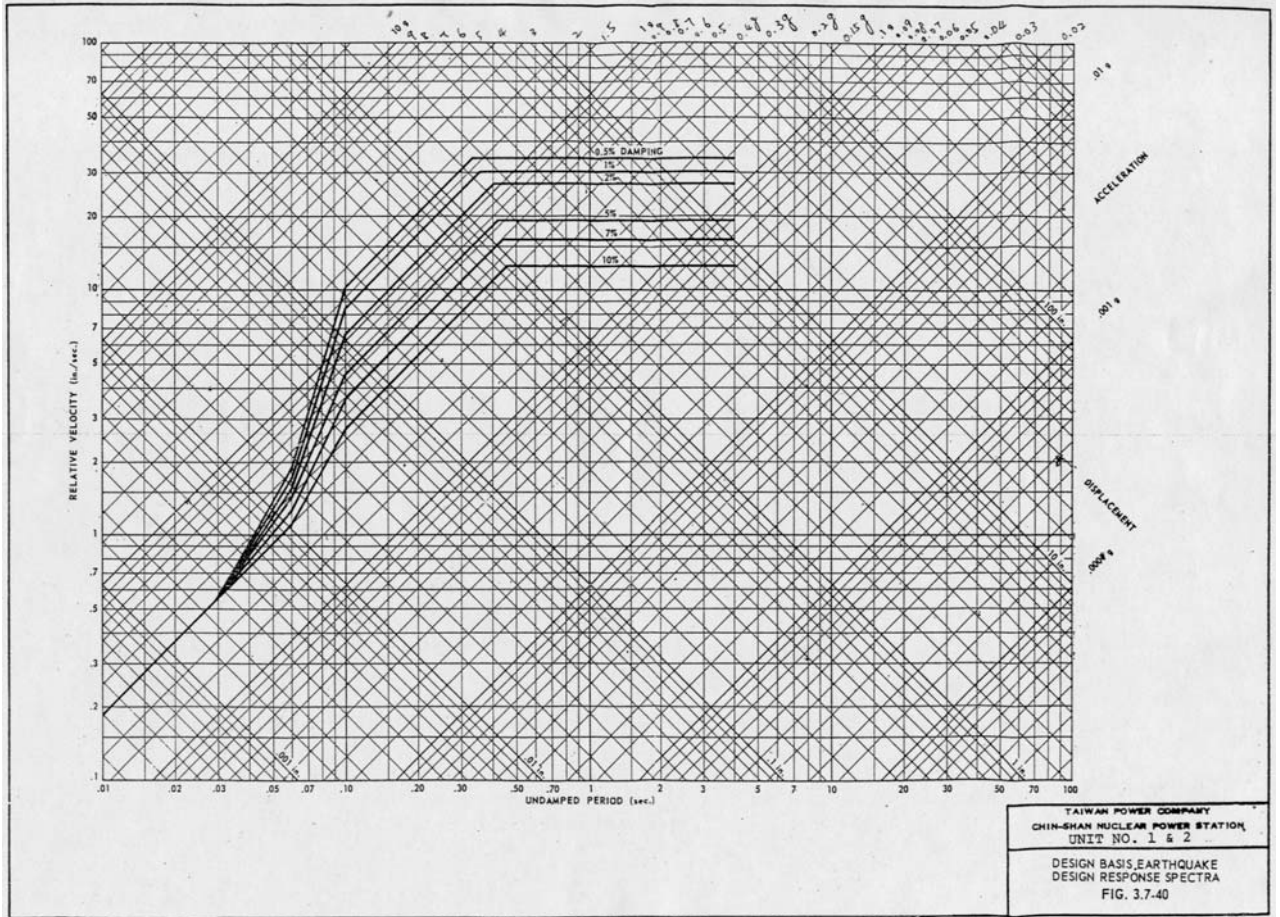
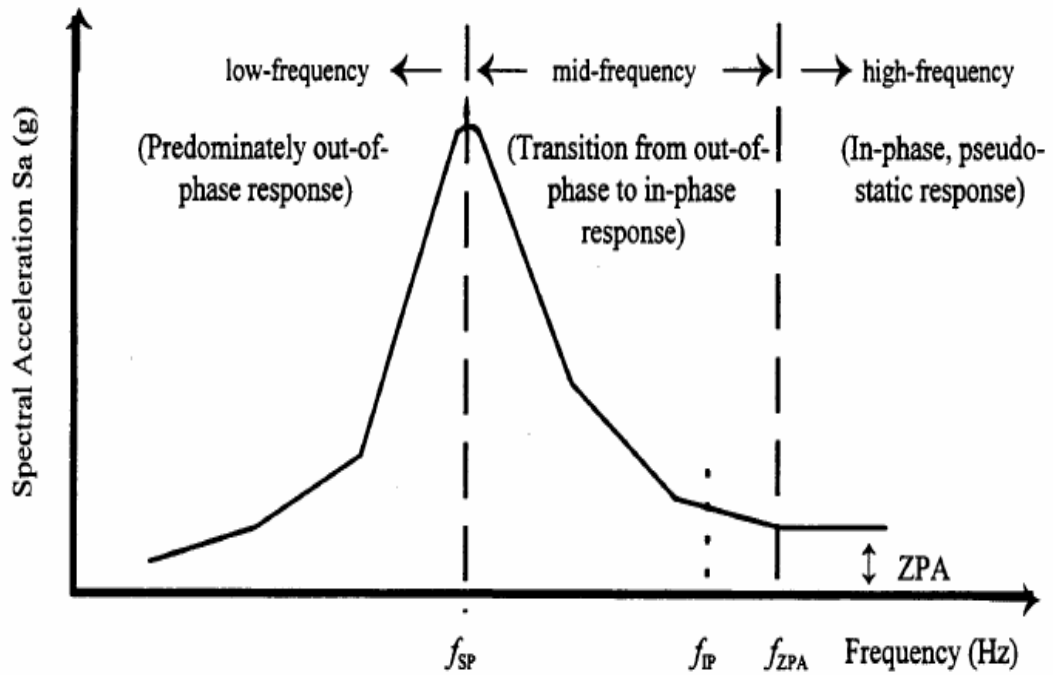


圖 2.10 核一廠地震反應譜(取自核一廠提供資料)



f_{SP} = 到達反應譜加速度極大值時的頻率；典型的建築物/土壤系統的基本頻率，

f_{ZPA} = 反應譜加速度回到零加速度時期 (ZPA)的頻率，

f_{IP} = 頻率大於此時，單自由度(SDOF)模態反應譜被認為是同相 (in phase)，隨著時間變化以輸入加速度而產生回應反應譜。

圖 2.11 被理想化的反應譜

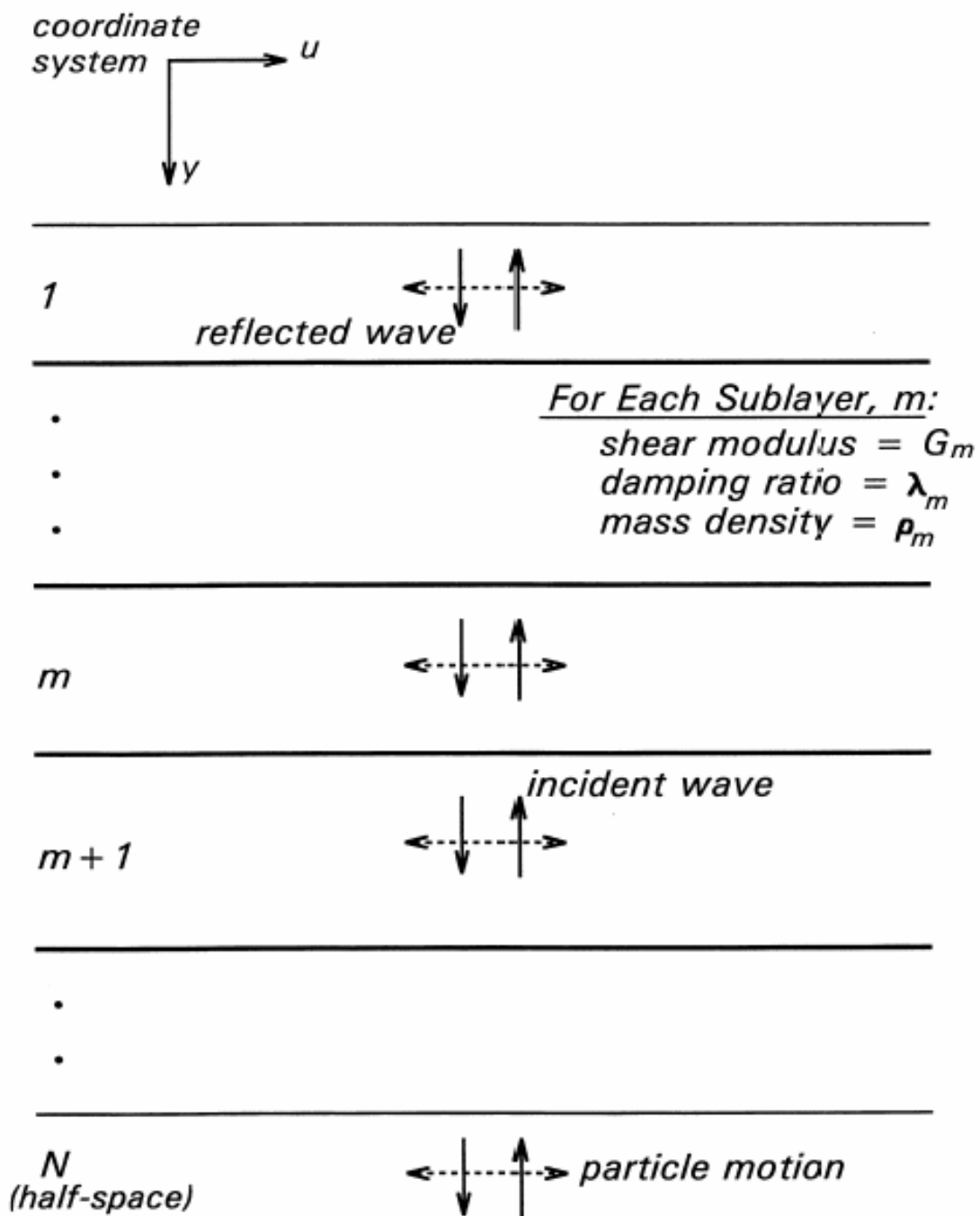


圖 3.1 一維土壤水平土層理想化特性圖 (取自 SHAKE 91 USER'S MANUAL)

- MAIN
- A1
- B1
- C1

Each module contains several subroutines as follows:

MODULE	SUBROUTINE	
MAIN	EARTHQ	
	CURVEG	
	STPG	
	RESP	
	DRCTSP	
	CMPMAX	
	FFT	
	RFFT	
	RFSN	
	XXM	
	B-1	AMP
		UTPR
		REDUCE
INCR		
MOTION		
CXSOIL		
STRAIN		
C-1	SHAKIT	
	STRT	
	SOILIN	
	CG	

圖 3.2 SHAKE 91[®] 程式主要架構(取自 SHAKE 91 USER'S MANUAL)

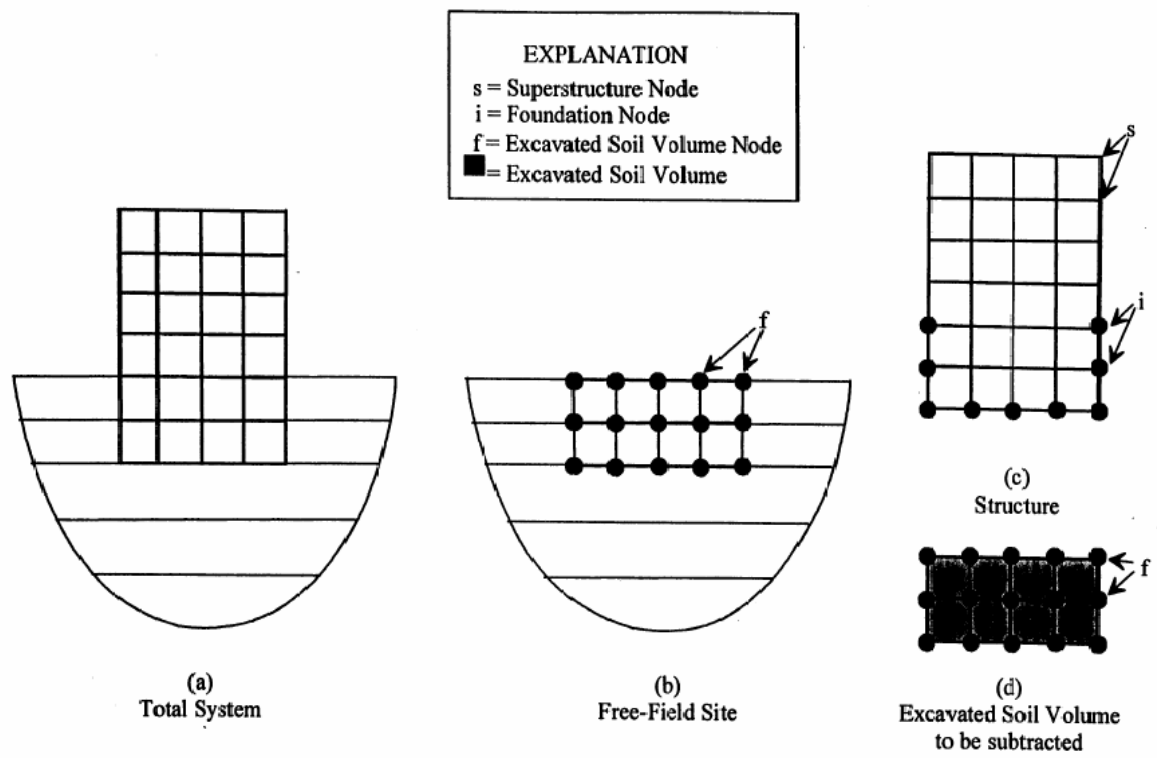
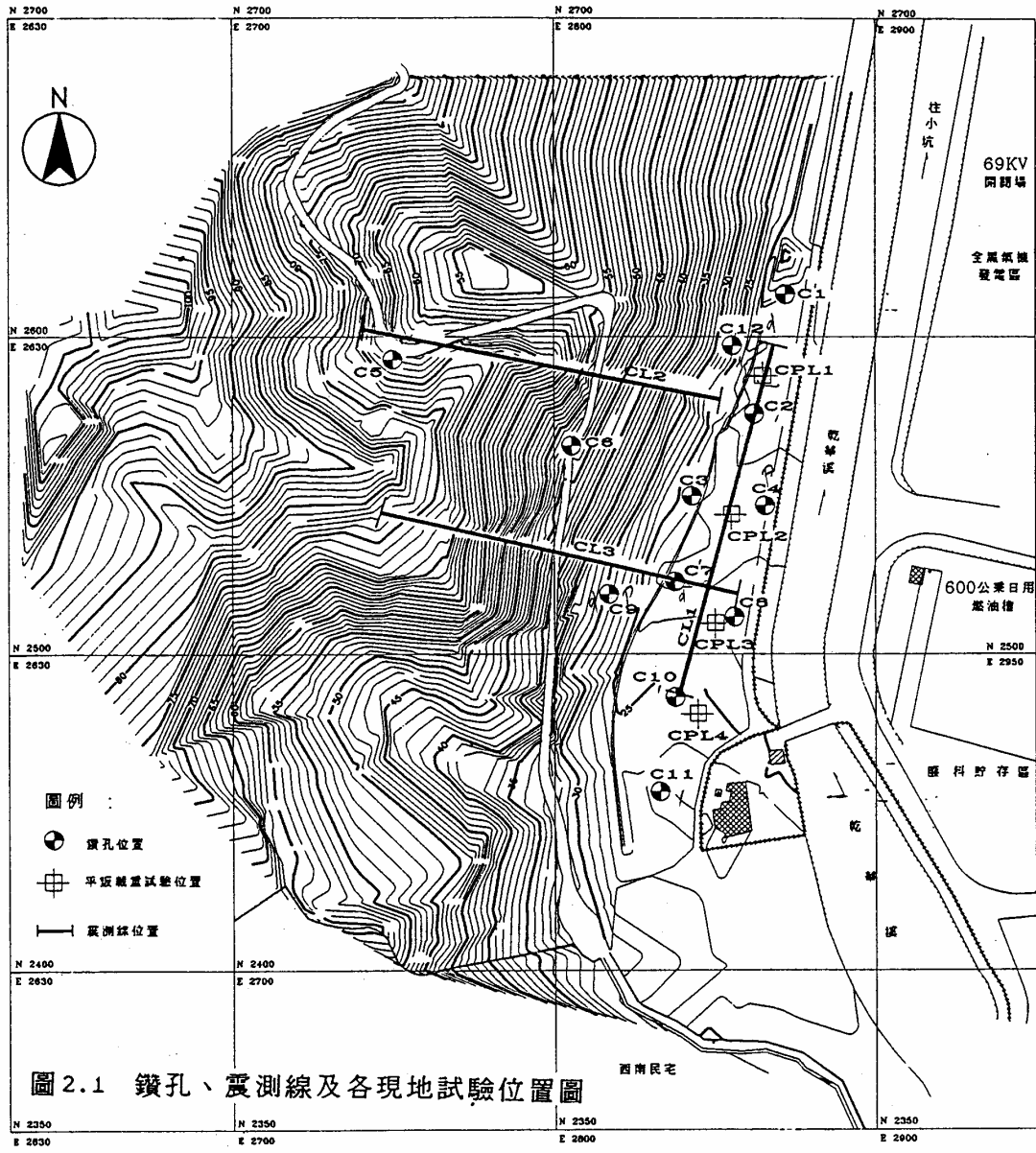


圖 3.3 SASSI[®] 柔性體積次結構法示意圖



繪圖/日期：張仰震 11/16/92 校核/日期：楊才盛 11/16/92

圖 3.4 鑽孔、震測線位置圖 (取自台電核一廠地質調查報告)

台灣電力公司
鑽孔地質柱狀剖面圖
TAIWAN POWER COMPANY GEOLOGIC LOG OF DRILL HOLE

工程名稱: 台電公司核能一廠用過核燃料中期貯存設施計劃候選廠址工程地質調查工作
PROJECT: Geotechnical Investigation For Taiwan Power Company Spent Fuel Interim Storage Facility At Chinshan Candidate Site
工程地點: 台北縣石門鄉核一廠
STATE: _____

鑽孔號碼 C-9 座標: N:2518.93 \ E:2817.15 地面標高 EL. 28.07 地頂角 0
HOLE NO. COORDINATES GROUND ELEVATION ANGLE FROM VERTICAL

開始日期 81.6.27 完成日期 81.7.2 岩盤覆蓋物深度 9.00 總深度 45.00 斜孔方向 —
BEGUN FINISHED DEPTH OF OVERBURDEN TOTAL DEPTH BEARING OF ANGLE HOLE

地下水位 EL. 21.72 地質鑑定者 聯合大地工程顧問公司 鑽探者 欣久工程公司
ELEV. OF WATER TABLE HOLE LOGGED BY Drilled By

孔徑 DOH	套管 或護 孔方 式 COH	涌水 率 FWL (%)	岩質 指標 RQD (%)	岩心 鑽取率 core Recovery (%)	深度 Depth (m)	柱狀 剖面 Log	N 值 SPT Blow No.	樣號 Sample No.	岩 層 特 性 描 述 Petrographical Description	層面或 節理之 傾 向 DOB . DOJ	節理 或破 碎程 度 JOF	風化 程度 DOW
		60			1		N=2	S-0	深褐色表土, 夾少量礫石 Subsoils, dark brown, with little gravels. 2.10m			
					2		N=14	S-1	安山岩礫石 -3.00~5.30m 粗砂夾有機物 Andesite cobbles and boulders -3.00~5.30m coarse sands with organic matters.			
					3		N=33	S-2				
					4		N>100	S-3				
					5		N>100	S-0				
					6			S-0				
					7							
					8	透水試驗						
					9		N=92	S-0	灰色砂岩, 中度膠結. Sandstone, gray, moderately cemented			
		85			10							W3
					11						f2	
					12							W1
					13							
					14							

DOH: Diameter of Hole
COH: Casing or Sealing Method
FWL: Flush Water Losses
SPT: Standard Penetration Test
RQD: Rock Quality Designation
DOB, DOJ: Dip of Bed, Dip of Joint
JOF: Jointing or Fragmentation
DOW: Degree of Weathering

f1: Complete core or with length more than 20 cm.
f2: Core broken into pieces with size ranging from 5cm to 20cm.
f3: Core broken into pieces with size ranging from 3cm to 5cm.
f4: Core broken into pieces with less than 3cm in size.
W1: Fresh core
W2: Slightly weathered, stained with limonite material or some contaminations
W3: Moderately weathered, core becoming friable or easily crumbled by fingers
W4: Highly weathered, core decomposed or altered, soft, loose and friable.

C-20

圖 3.5 C-9 鑽孔地質柱狀剖面圖 (1) (取自台電核一廠地質調查報告)

台灣電力公司
鑽孔地質柱狀剖面圖
TAIWAIN POWER COMPANY GEOLOGIC LOG OF DRILL HOLE

工程名稱：台電公司核能一廠用過核燃料中期貯存設施計劃候選廠址工程地質調查工作
PROJECT: Geotechnical Investigation For Taiwan Power Company Spent Fuel Interim Storage Facility At Chinshan Candidate Site
工程地點 台北縣石門鄉核一廠
STATE

鑽孔號碼 C-9 座標: N:2518.93 \ E:2817.15 地面標高 EL. 28.07 地頂角 0
HOLE NO. COORDINATES GROUND ELEVATION ANGLE FROM VERTICAL

開始日期 81.6.27 完成日期 81.7.2 岩盤覆蓋物深度 9.00 總深度 45.00 斜孔方向 —
BEGUN FINISHED DEPTH OF OVERBURDEN TOTAL DEPTH BEARING OF ANGLE HOLE

地下水位 EL. 21.72 地質鑑定者 聯合大地工程顧問公司 鑽探者 欣久工程公司
ELEV. OF WATER TABLE HOLE LOGGED BY Drilled By

孔徑 DOH	套管 或護 孔方 式 COSM	涌水 率 FWL (%)	岩質 指標 RQD (%)	岩心 鑽取率 core Recovery (%)	深度 Depth (m)	柱狀 剖面 Log	N 值 SPT Blow No.	樣號 Sample No.	岩層 特性 描述 Petrographical Description	層面或 節理之 傾向 DOB . DOJ	節理 或破 碎程 度 JOF	風化 程度 DOW
			46	100	16				灰色砂岩, 中度膠結			
		80	25	95	17							
				100	18							
				95	19							
			14	100	20				Sandstone, gray, moderately cemented		f2	
				100	21					J70		
			15	95	22							
				95	23							
				100	24							
				100	25				24.80m			
				100	26				灰色砂岩, 膠結疏鬆, 易分解成砂粒, 偶夾岩塊			
				100	27							
				100	28				Sandstone, gray, poorly cemented, easy become loose sands, occasionally with core.		f3	
				100	29							

DOH : Diameter of Hole
COSM: Casing or Sealing Method
FWL : Flush Water Losses
SPT : Standard Penetration Test
RQD : Rock Quality Designation
DOB . DOJ : Dip of Bed . Dip of Joint
JOF : Jointing or Fragmentation
DOW : Degree of Weathering

f---complete core or with length more than 20 cm.
f2: Core broken into pieces with size ranging from 5cm to 20cm.
f3: Core broken into pieces with size ranging from 3cm to 5cm.
f4: Core broken into pieces with less than 3cm in size.
W1: Fresh core
W2: Slightly weathered, stained with limonite material or some contaminations
W3: Moderately weathered, core becoming friable or easily crumbled by fingers
W4: Highly weathered, core decomposed or altered, soft, loose and friable.

C-21

圖 3.6 C-9 鑽孔地質柱狀剖面圖 (2) (取自台電核一廠地質調查報告)

台灣電力公司
鑽孔地質柱狀剖面圖
TAIWAN POWER COMPANY GEOLOGIC LOG OF DRILL HOLE

工程名稱：台電公司核能一廠用過核燃料中期貯存設施計劃候選廠址工程地質調查工作
PROJECT: Geotechnical Investigation For Taiwan Power Company Spent Fuel Interim Storage Facility At Chinshan Candidate Site
工程地點：台北縣石門鄉核一廠
STATE

鑽孔號碼 C-9 座標：N:2518.93 \ E:2817.15 地面標高 EL. 28.07 地頂角 0
HOLE NO. COORDINATES GROUND ELEVATION ANGLE FROM VERTICAL

開始日期 81.6.27 完成日期 81.7.2 岩盤覆蓋物深度 9.00 總深度 45.00 斜孔方向 —
BEGUN FINISHED DEPTH OF OVERBURDEN TOTAL DEPTH BEARING OF ANGLE HOLE

地下水位 EL. 21.72 地質鑑定者 聯合大地工程顧問公司 鑽探者 欣久工程公司
ELEV. OF WATER TABLE HOLE LOGGED BY Drilled By

孔徑 DOH	套管 或護 孔方 式 OSM	遇水 率 FWL (%)	岩質 指標 RQD (%)	岩心 鑽取率 core Recovery (%)	深度 Depth (m)	柱狀 剖面 Log	N 值 SPT Blow No.	樣號 Sample No.	岩層 特 性 描 述 Petrographical Description	層面或 節理之 傾角 DOJ	節理 或破 碎程 度 JOF	風化 程度 DOW
↑ NX ↓		80	100	100	31	[Patterned Log]			灰色砂岩, 膠結疏鬆, 易分解成砂粒, 偶夾岩塊 Sandstone, gray, poorly cemented, easy become loose sands, occasionally with intact core.	J70	f3	W3
					32							
					33							
					34							
					35							
					36							
					37							
					38							
					39							
					40							
					41							
					42							
					43							
					44			End of boring 45.00m				

DOH: Diameter of Hole
OSM: Casing or Sealing Method
FWL: Flush Water Losses
SPT: Standard Penetration Test
RQD: Rock Quality Designation
DOJ: Dip of Bed. Dip of Joint
JOF: Jointing or Fragmentation
DOW: Degree of Weathering

f1: Complete core or with length more than 20 cm.
f2: Core broken into pieces with size ranging from 5cm to 20cm.
f3: Core broken into pieces with size ranging from 3cm to 5cm.
f4: Core broken into pieces with less than 3cm in size.
W1: Fresh core
W2: Slightly weathered, stained with limonite material or some contaminations
W3: Moderately weathered, core becoming friable or easily crumbled by fingers
W4: Highly weathered, core decomposed or altered, soft, loose and friable.

C-22

圖 3.7 C-9 鑽孔地質柱狀剖面圖 (3) (取自台電核一廠地質調查報告)

C7鑽孔縱波、橫波速度值及動態剪力、楊氏模數、包生比分佈表

深度 Depth(m)	縱波速度 Vp(m/sec)	橫波速度 Vs(m/sec)	動態剪力模數 Gd(kg/cm ²)	動態楊氏模數 Ed(kg/cm ²)	包生比 Poisson ratio
0~8.2	1464	348	2471	7266	0.47
8.2~26	1647	536	5951	17148	0.44

設計 DGN	黃嘉印 81-9-1	校核 CHK	81-9-10 81-9-10
-----------	---------------	-----------	--------------------

C9鑽孔縱波、橫波速度值及動態剪力、楊氏模數、包生比分佈表

深度 Depth(m)	縱波速度 Vp(m/sec)	橫波速度 Vs(m/sec)	動態剪力模數 Gd(kg/cm ²)	動態楊氏模數 Ed(kg/cm ²)	包生比 Poisson ratio
0~4	776	270	1383	3960	0.431
4~10	1504	502	5142	14784	0.437
10~44	2230	641	8972	26108	0.454

設計 DGN	黃嘉印 81-9-1	校核 CHK	81-9-10 81-9-10
-----------	---------------	-----------	--------------------

C12鑽孔縱波、橫波速度值及動態剪力、楊氏模數、包生比分佈表

深度 Depth(m)	縱波速度 Vp(m/sec)	橫波速度 Vs(m/sec)	動態剪力模數 Gd(kg/cm ²)	動態楊氏模數 Ed(kg/cm ²)	包生比 Poisson ratio
0~7	1147	328	2118	6167	0.455
7~25	2232	651	9254	26902	0.453

設計 DGN	黃嘉印 81-9-1	校核 CHK	81-9-10 81-9-10
-----------	---------------	-----------	--------------------

圖 3.8 C-7、C-9、C-12 波速及動態模數表 (取自台電核一廠地質調查
報告)

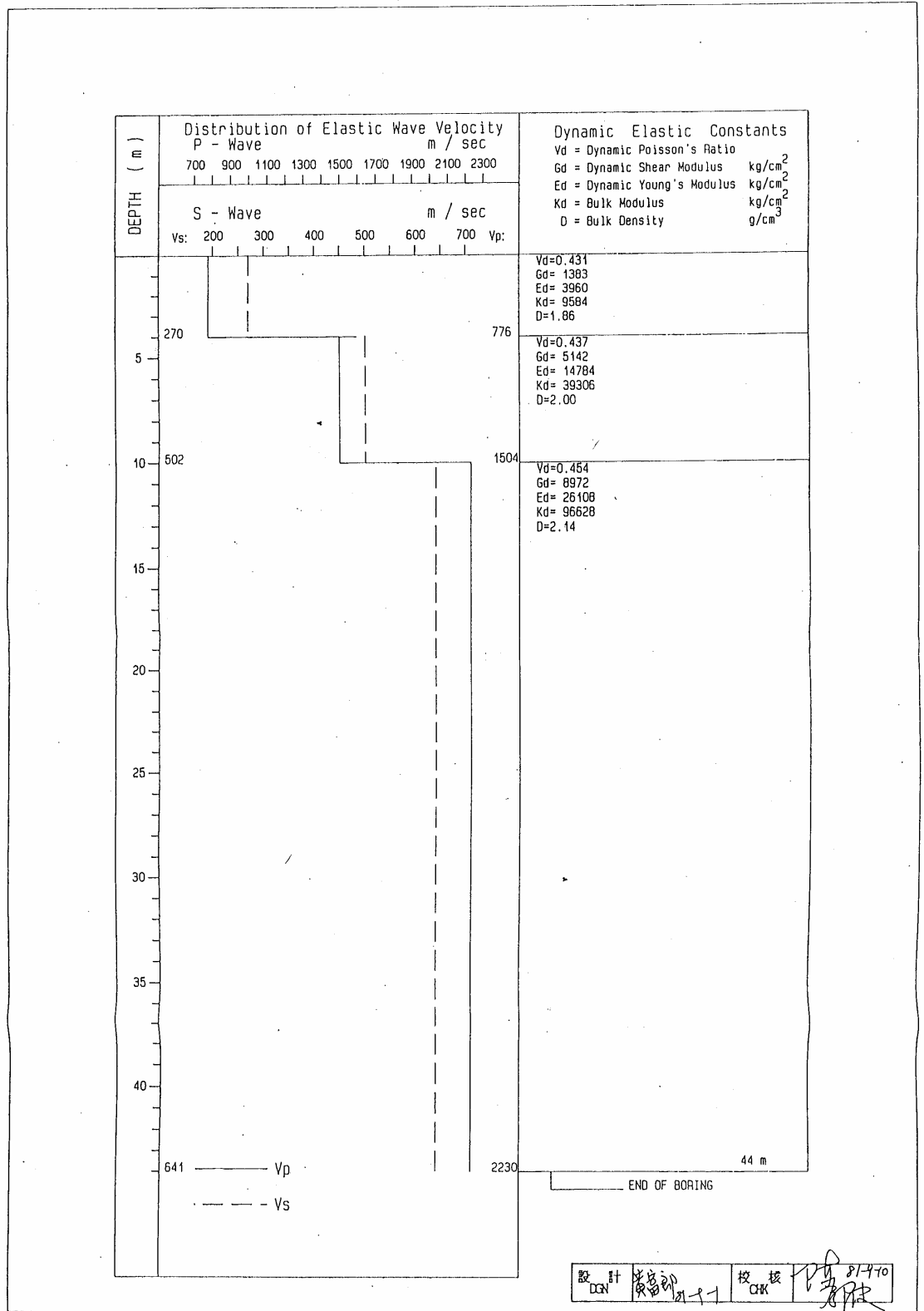


圖 3.9 C-9 鑽孔縱、橫波及動態模數圖 (取自台電核一廠地質調查報

告)

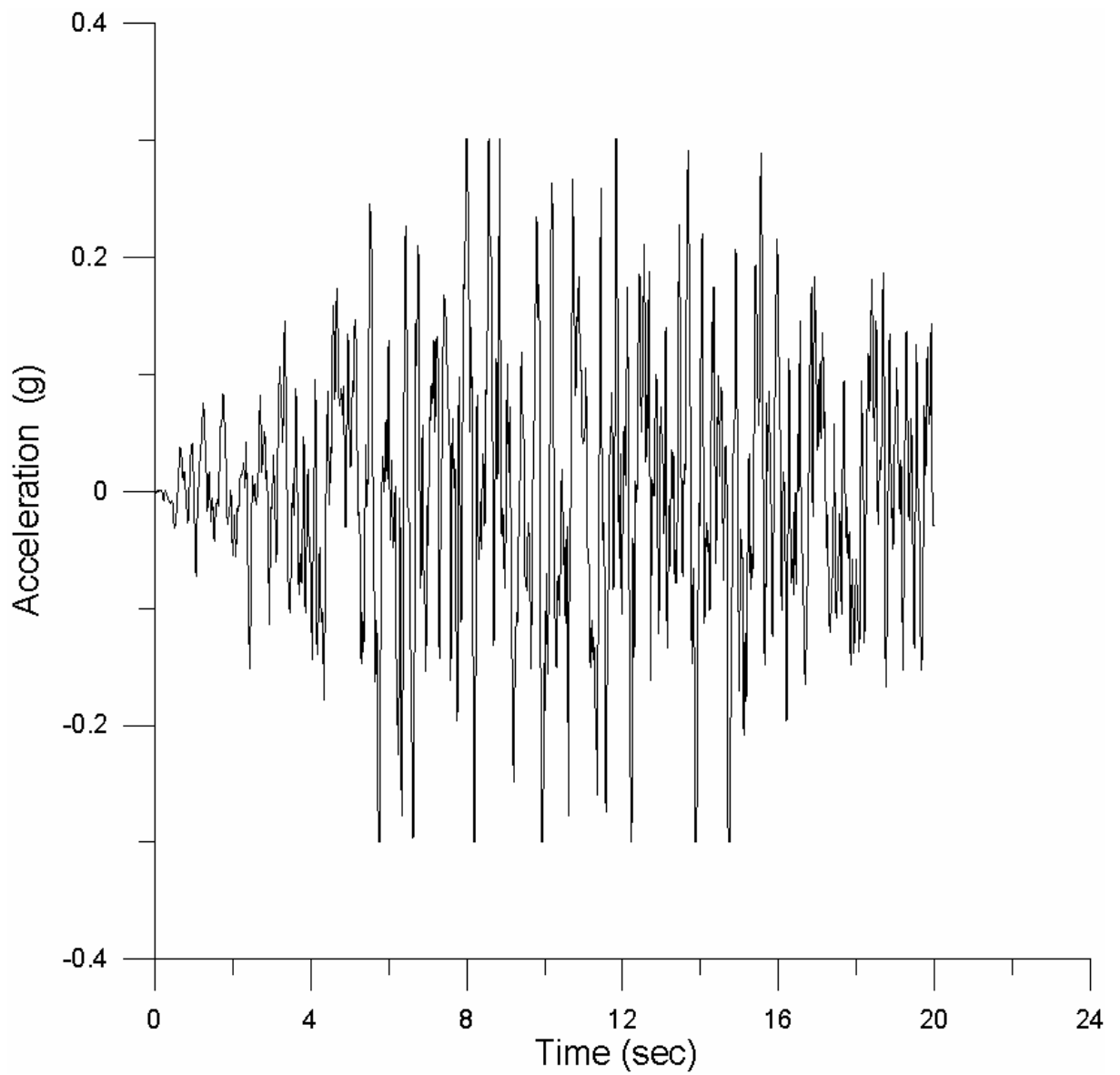


圖 3.10 核一廠地震加速度歷時記錄(由 SIMQKE 建立)

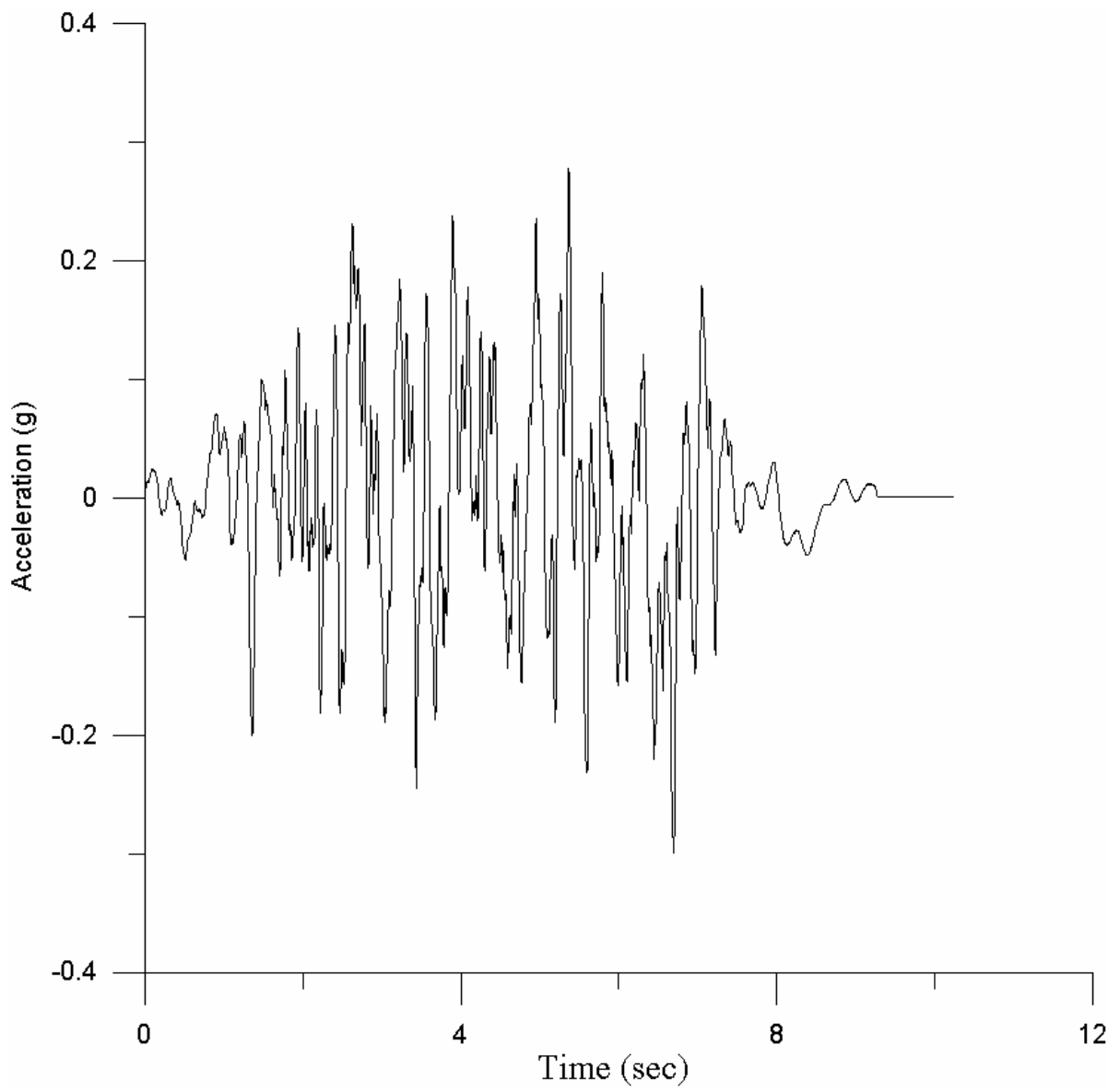


圖 3.11 核一廠地震加速度歷時記錄(由 STARDYNE[®]建立)

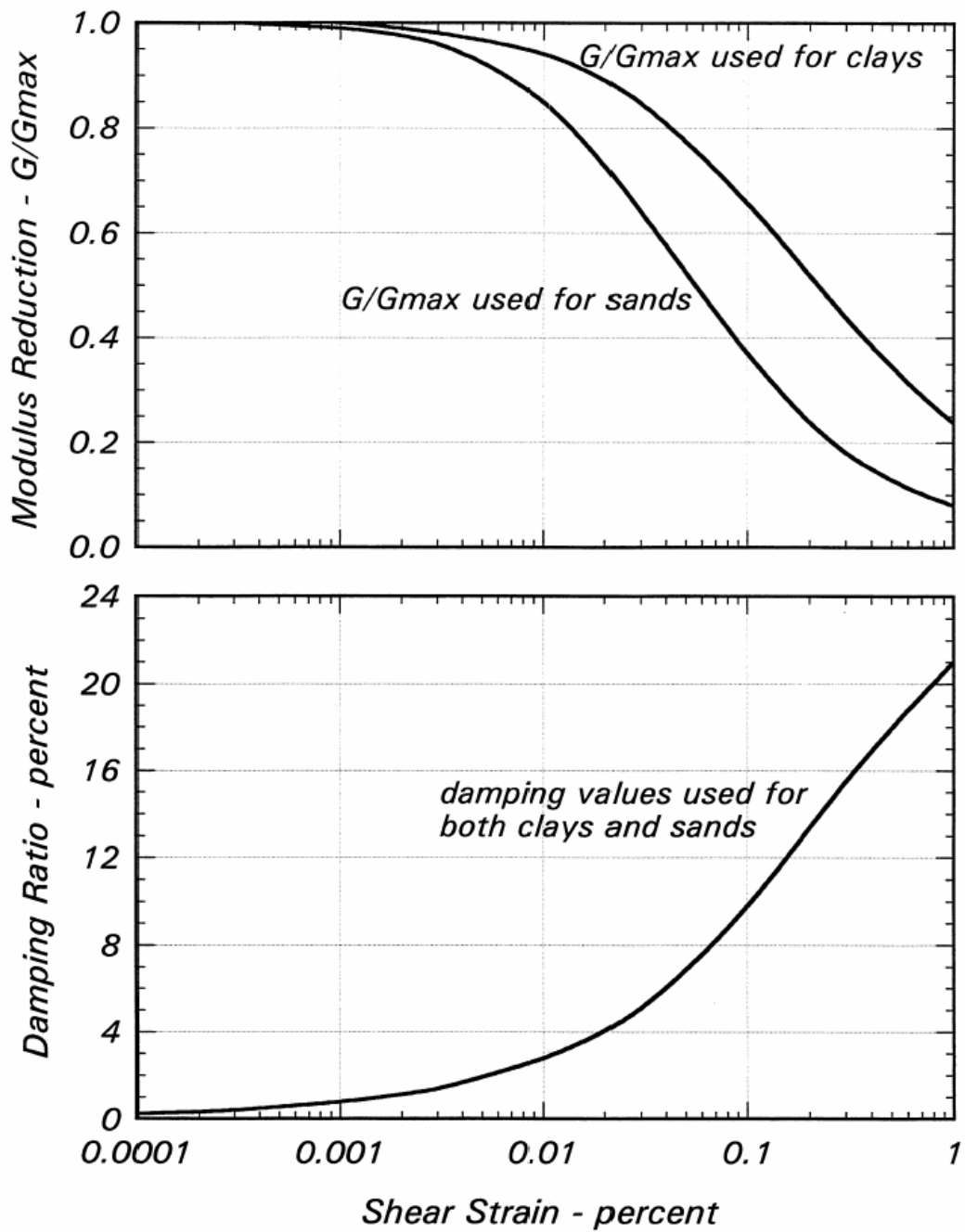


圖 3.12 實驗室對應剪應變之模數折減與阻尼比曲線圖 (取自 SHAKE

91 USER'S MANUAL)

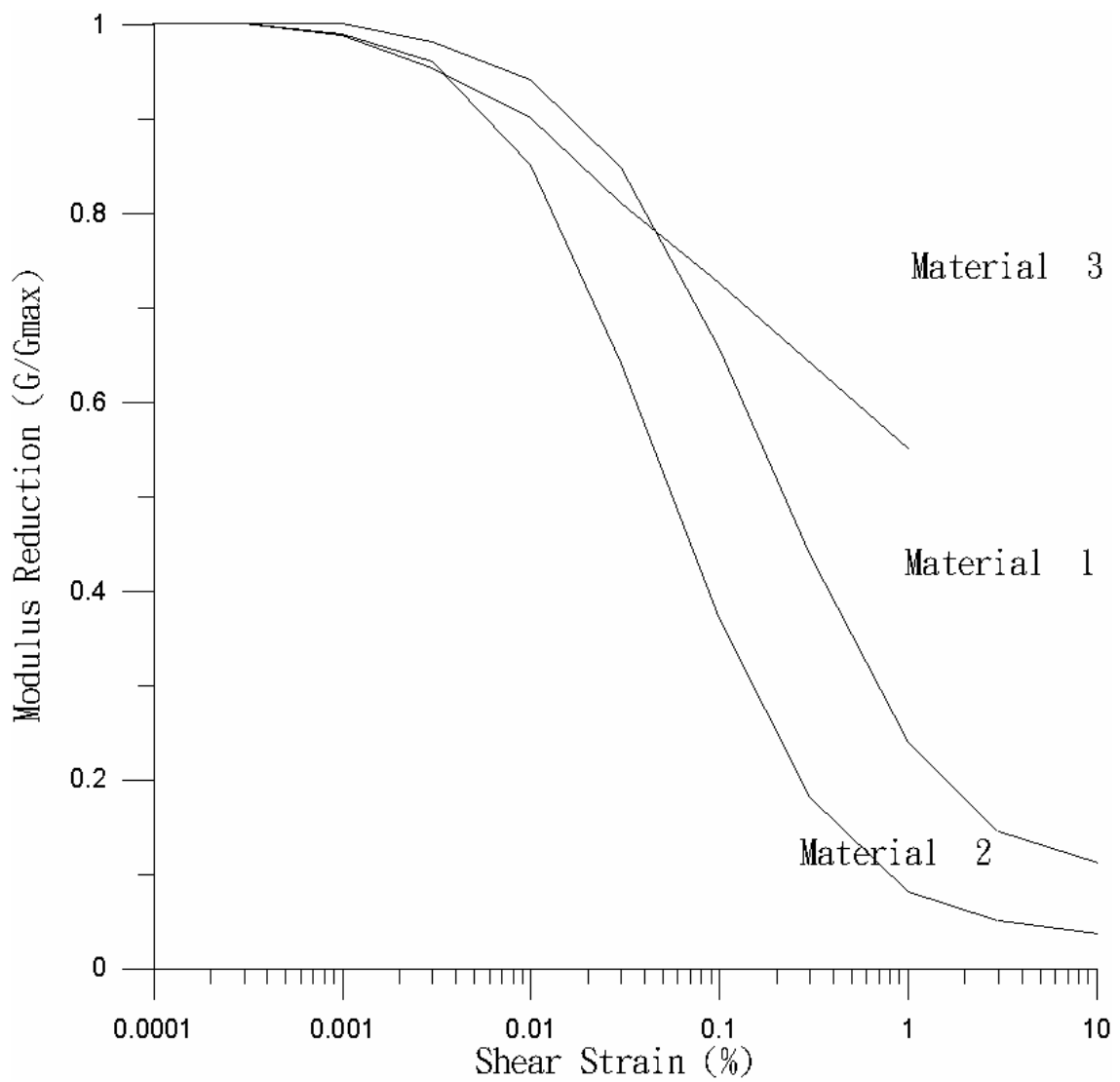


圖 3.13 對應剪應變之模數折減曲線圖

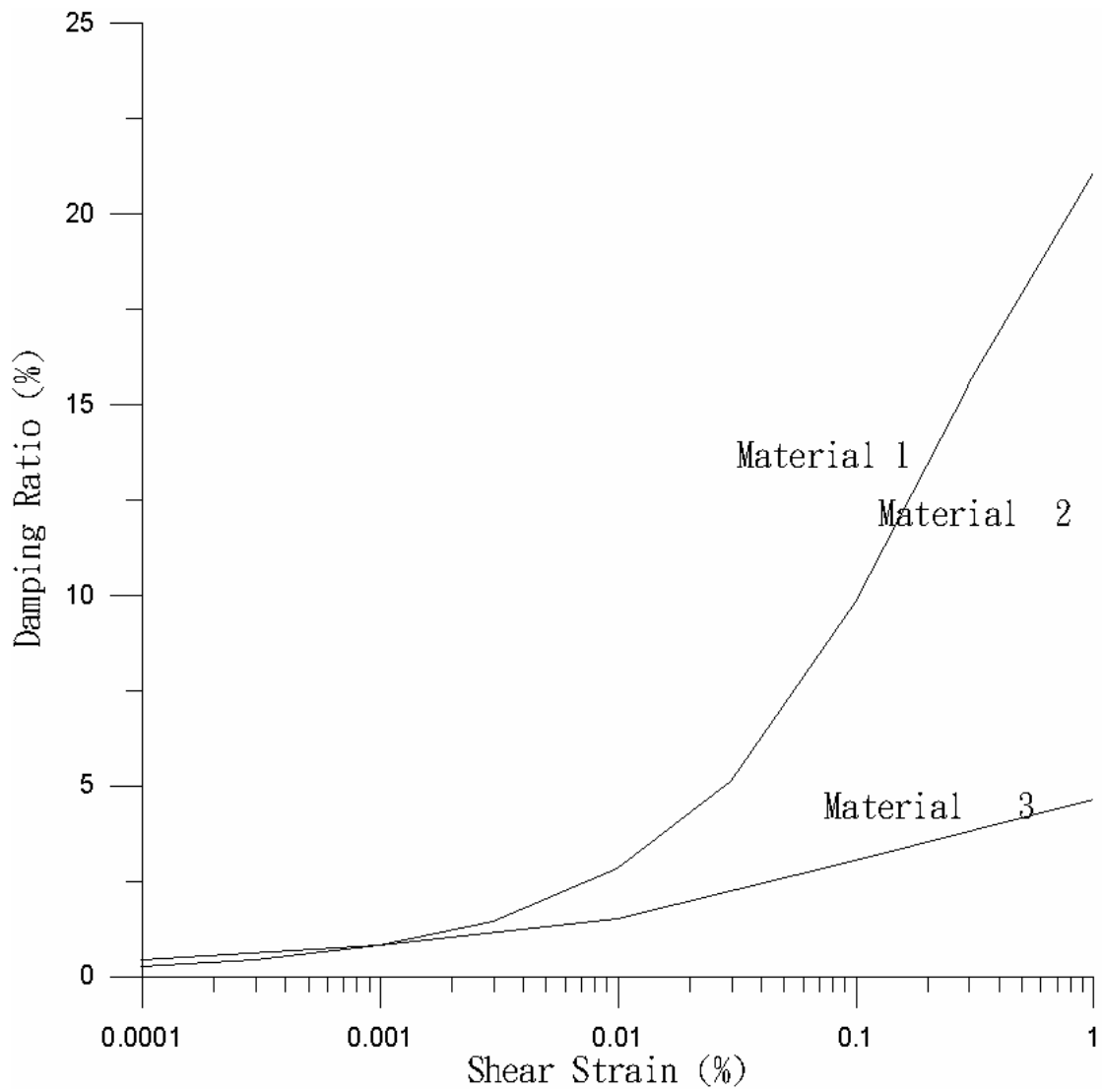


圖 3.14 對應剪應變之阻尼比曲線圖

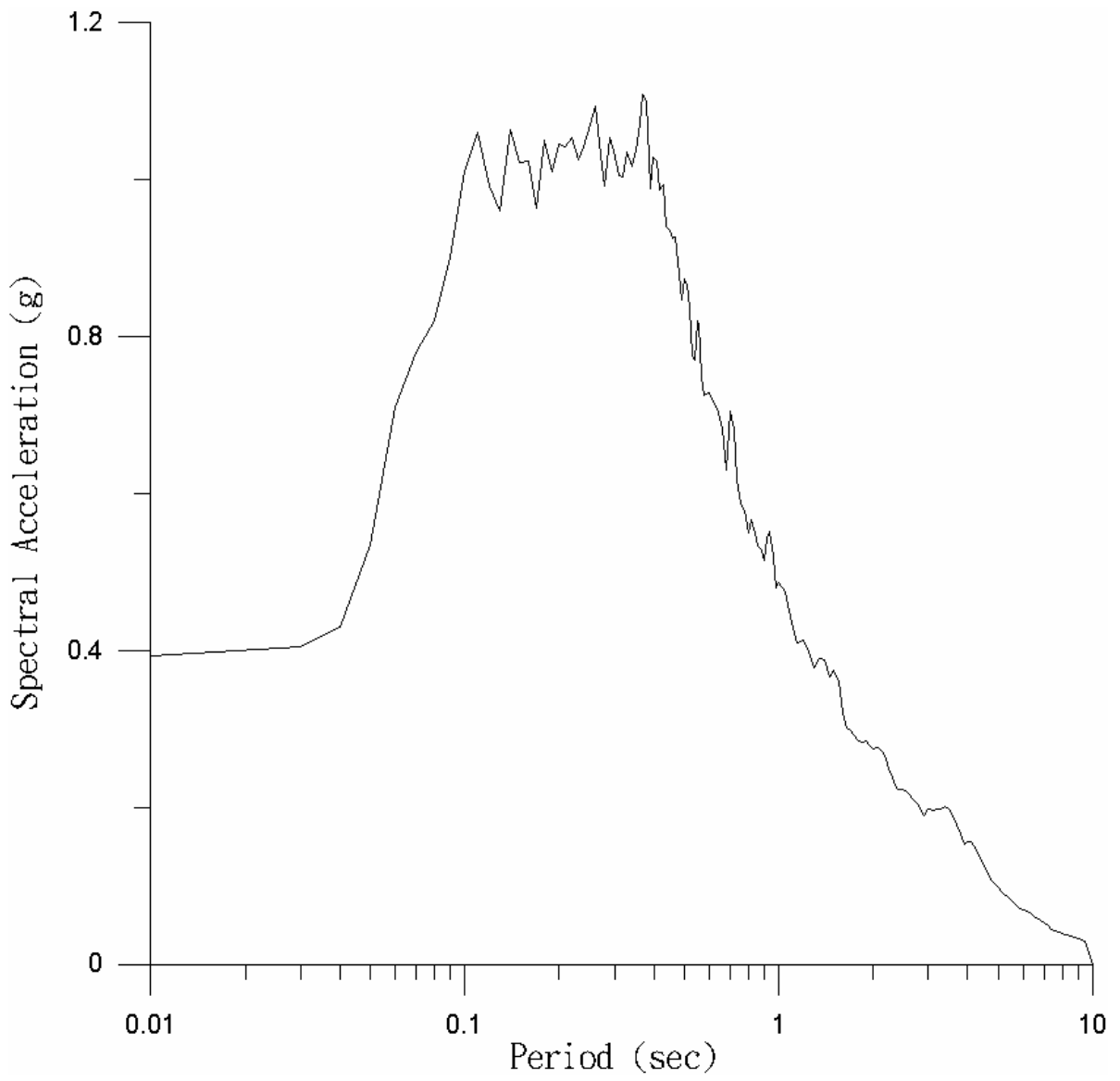


圖 3.15 反應譜加速度圖

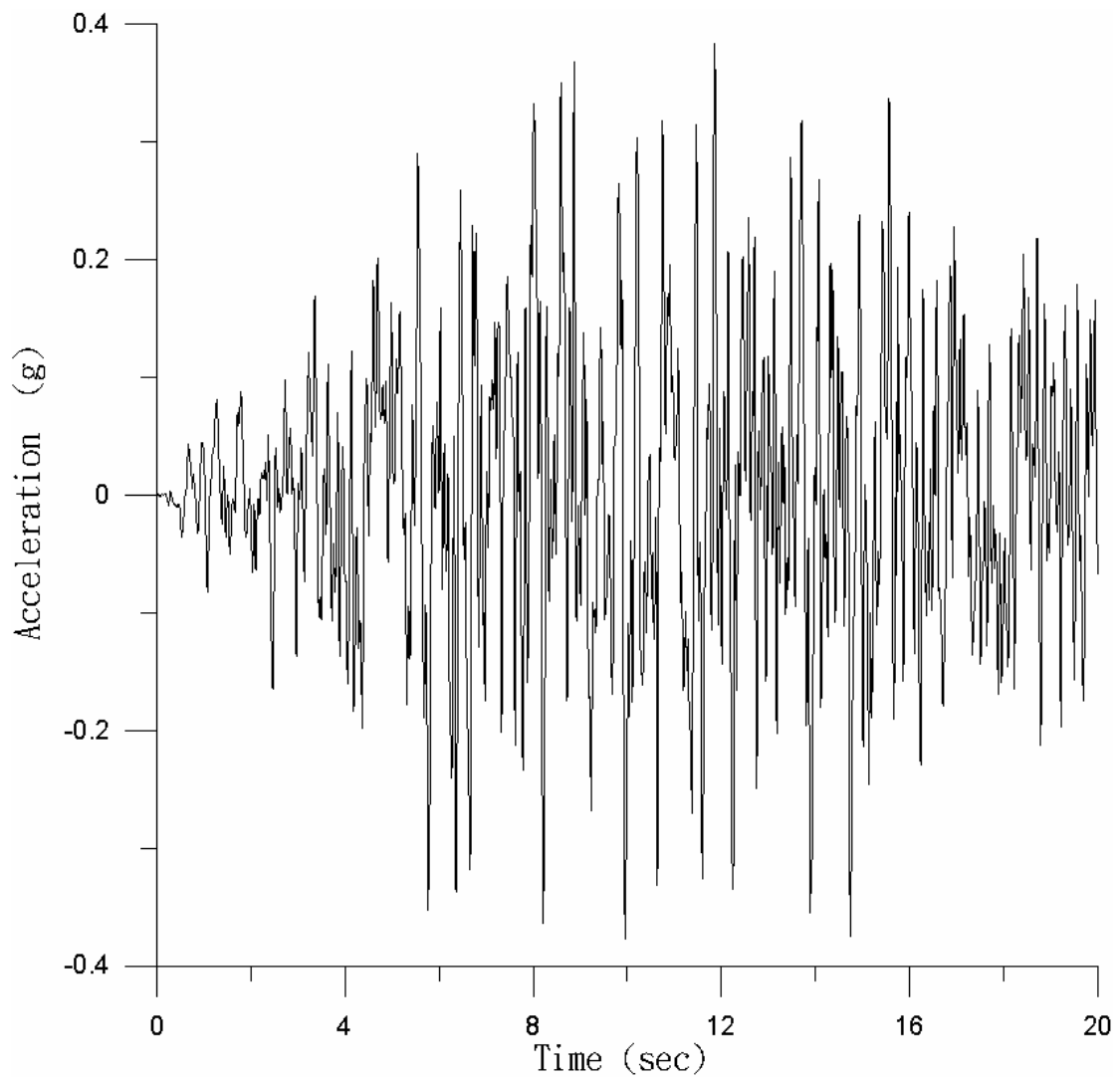


圖 3.16 計算後加速度反應譜

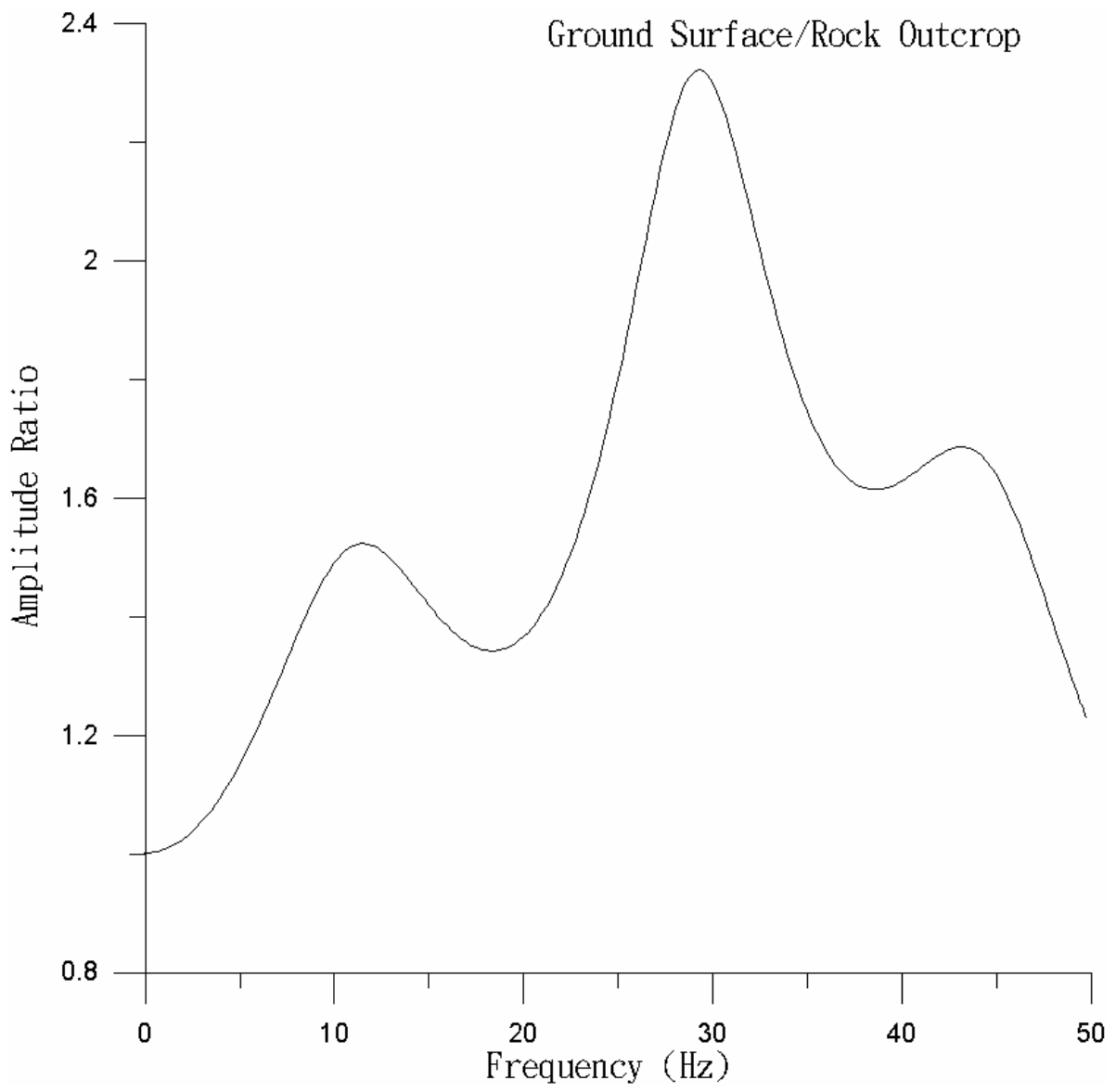


圖 3.17 計算後放大反應譜圖

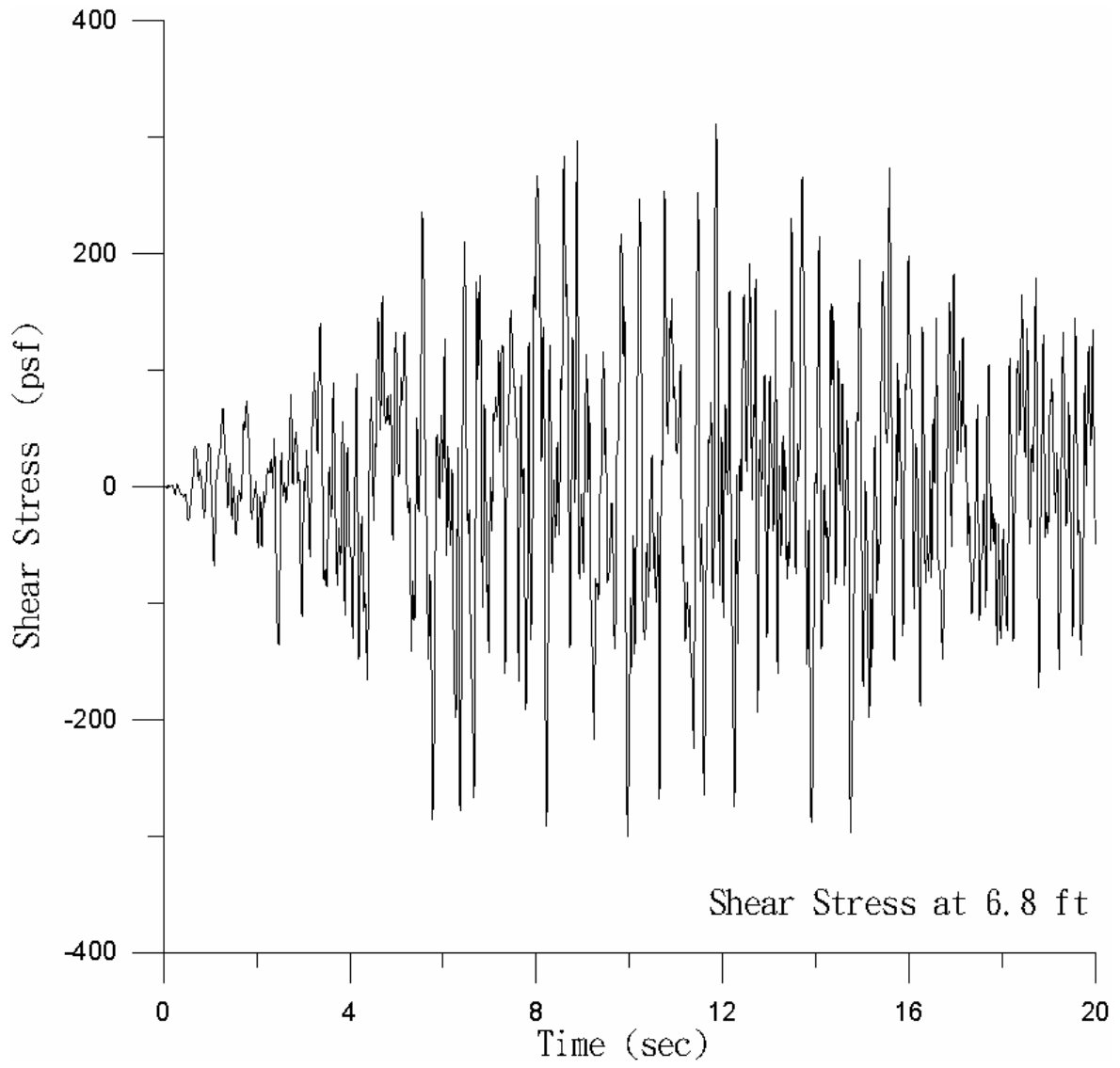


圖 3.18 位於地下 6.8 ft 剪應力歷時圖

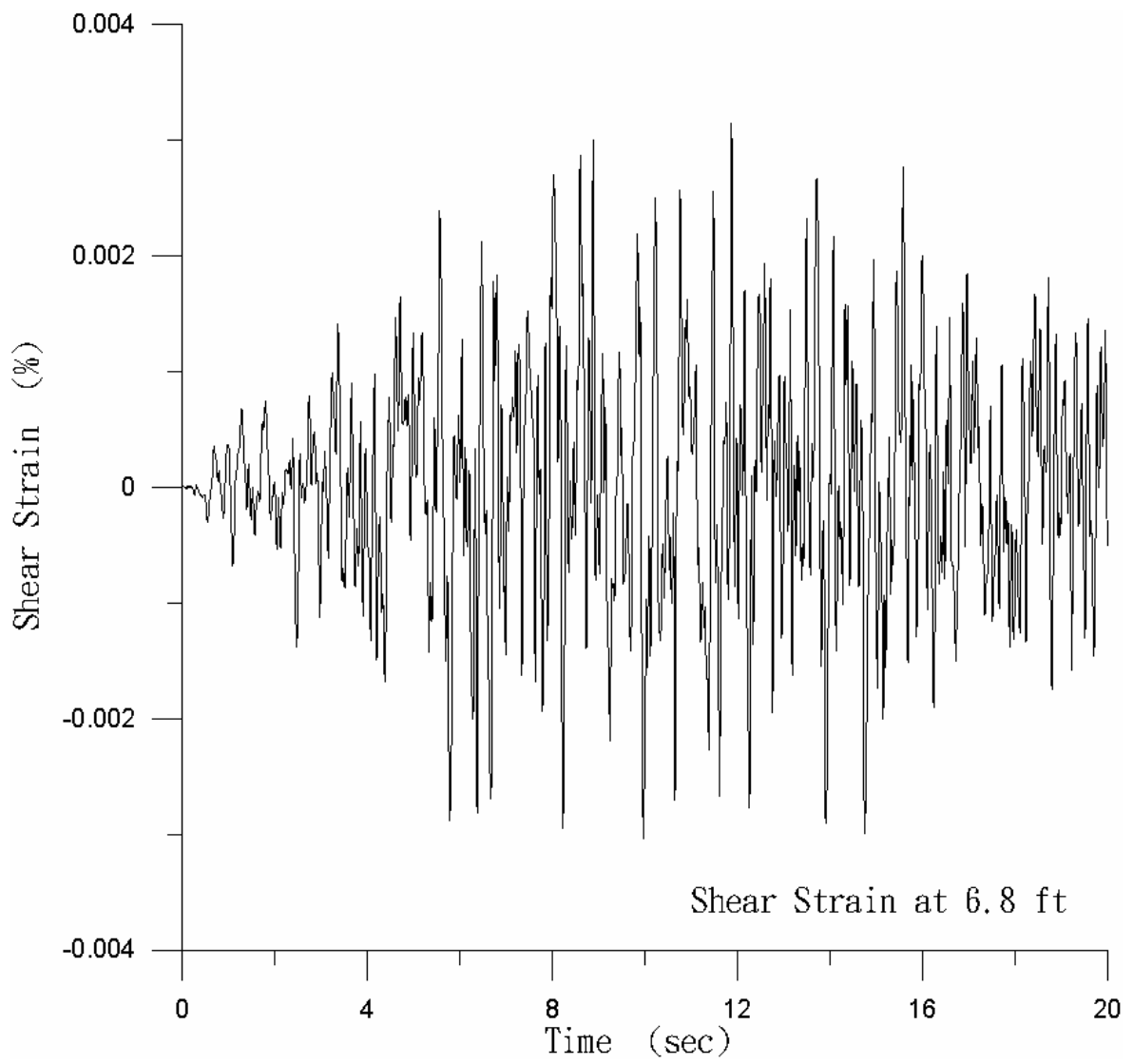


圖 3.19 位於地下 6.8 ft 剪應變歷時圖

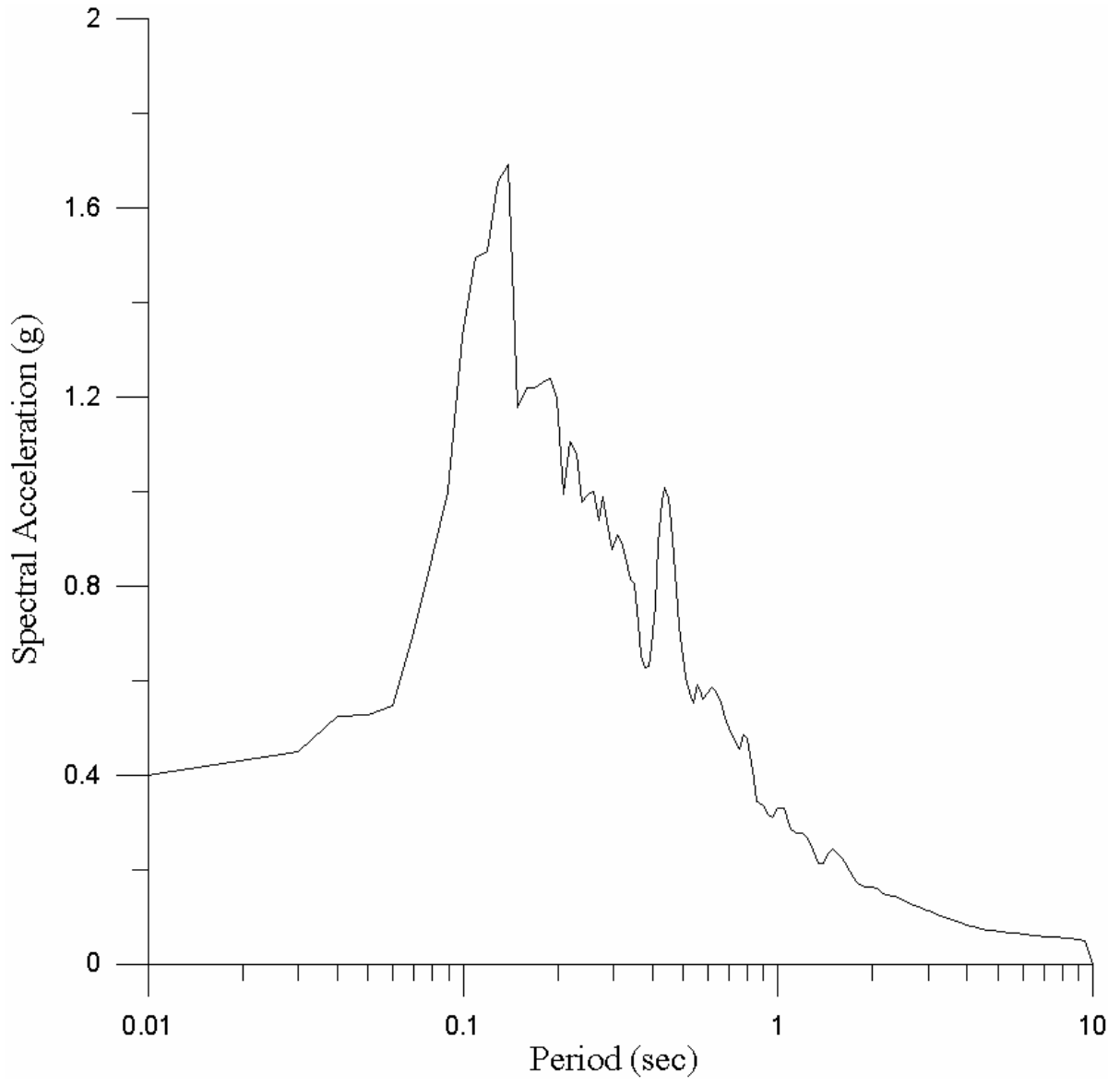


圖 3.20 反應譜加速度圖

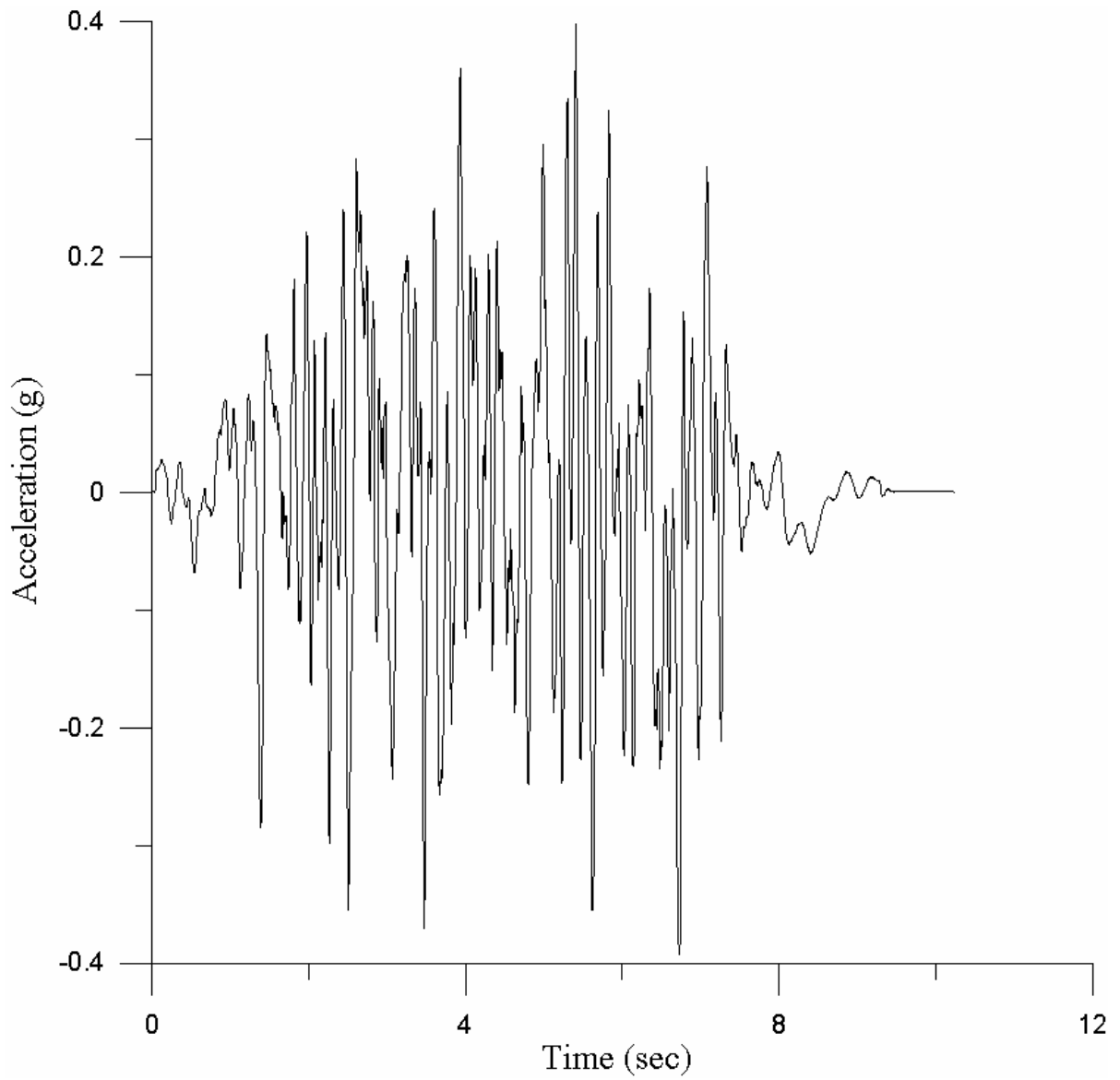


圖 3.21 計算後加速度反應譜

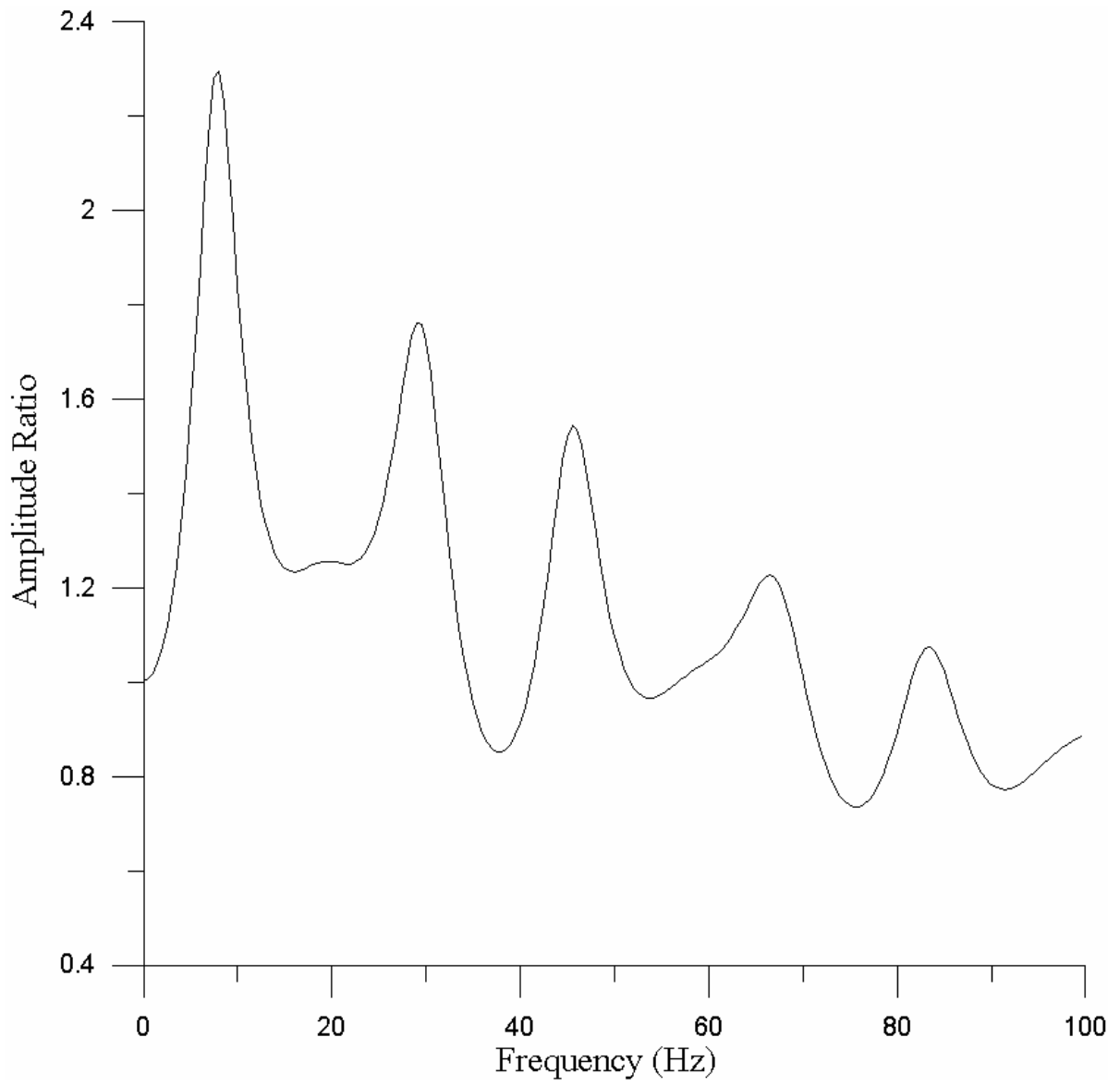


圖 3.22 計算後放大反應譜圖

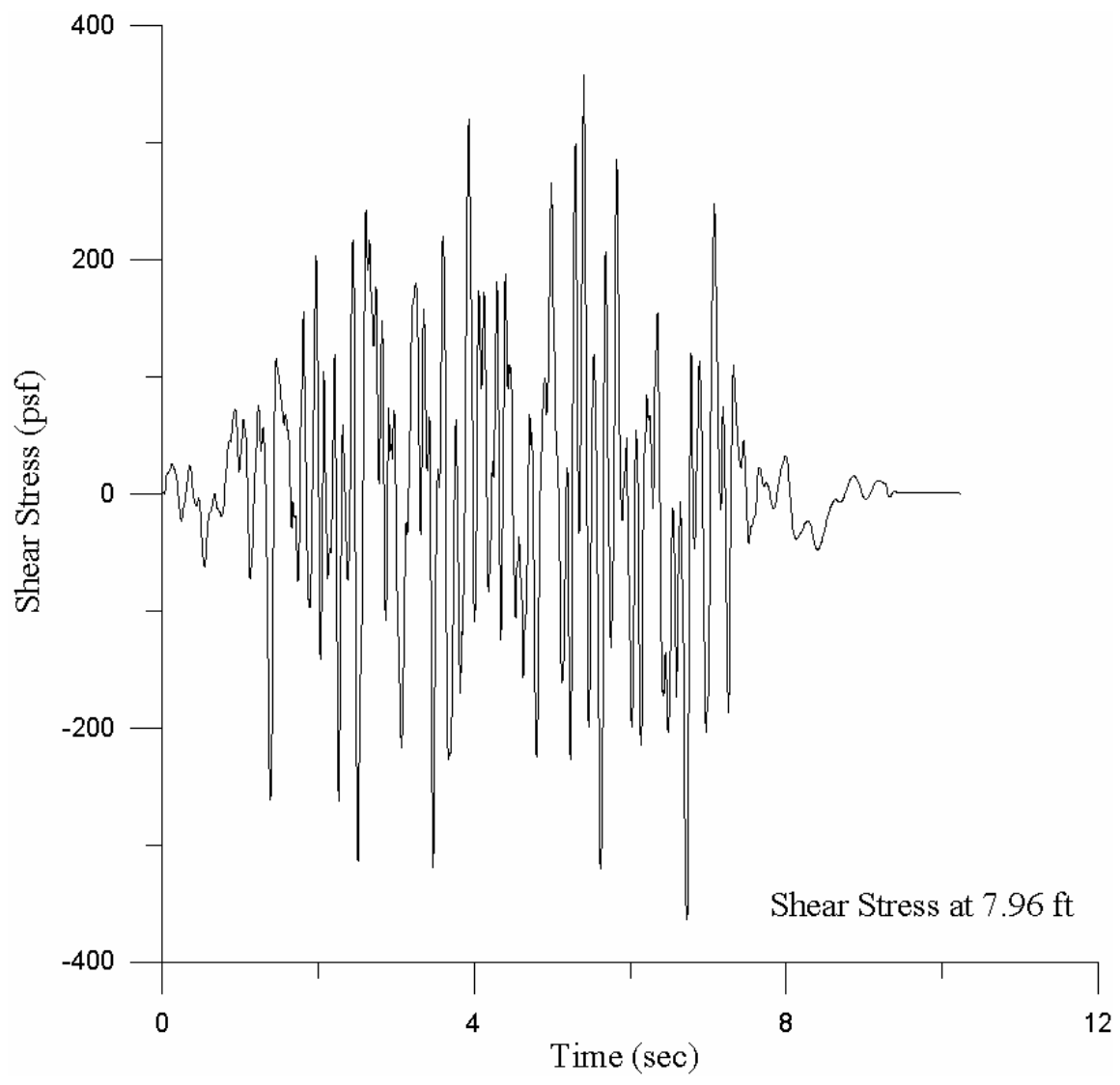


圖 3.23 位於地下 7.96 ft 剪應力歷時圖

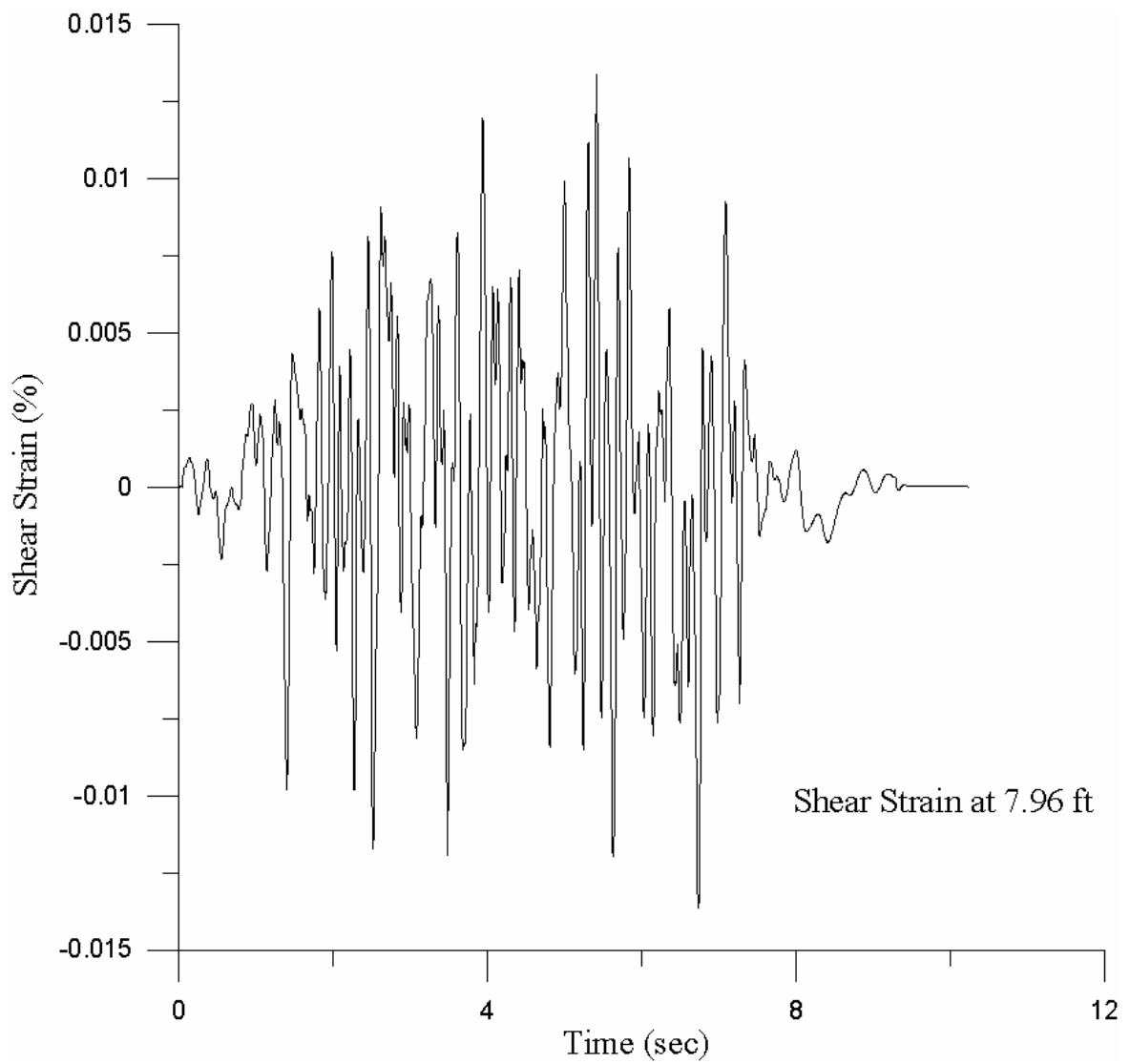


圖 3.24 位於地下 7.96 ft 剪應變歷時圖

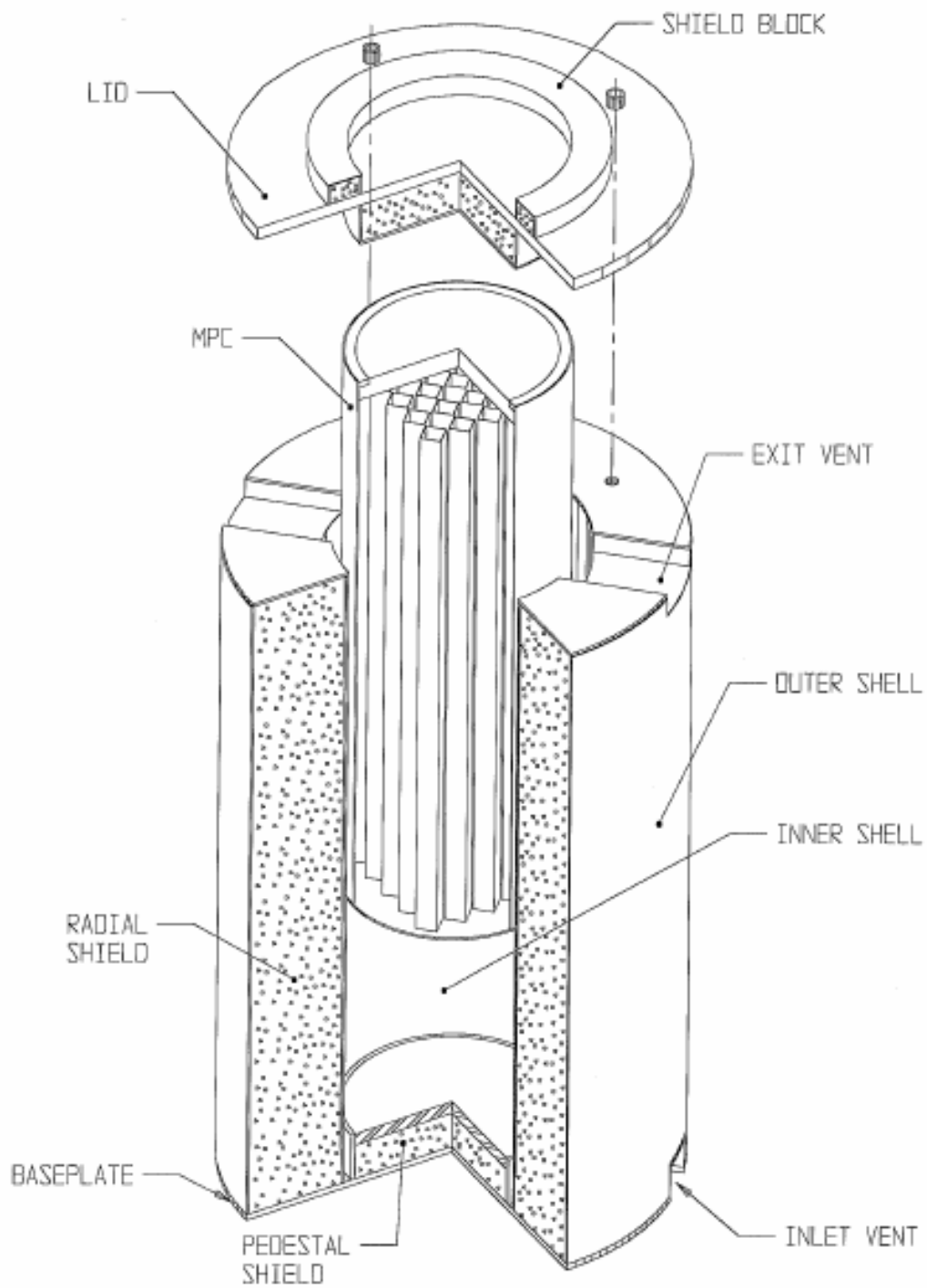


圖 4.1 HI-STORM 100[®] 示意圖(一)

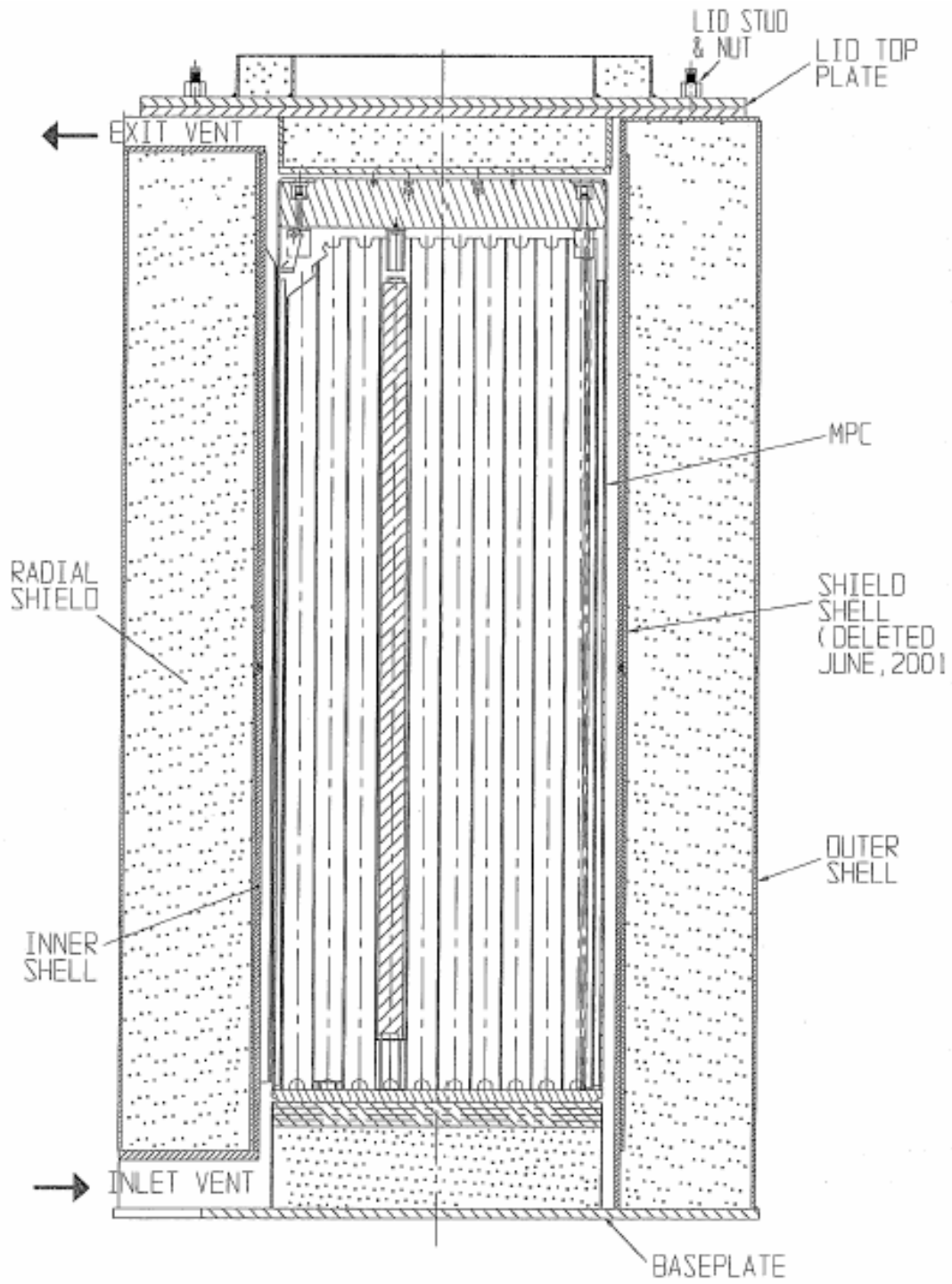
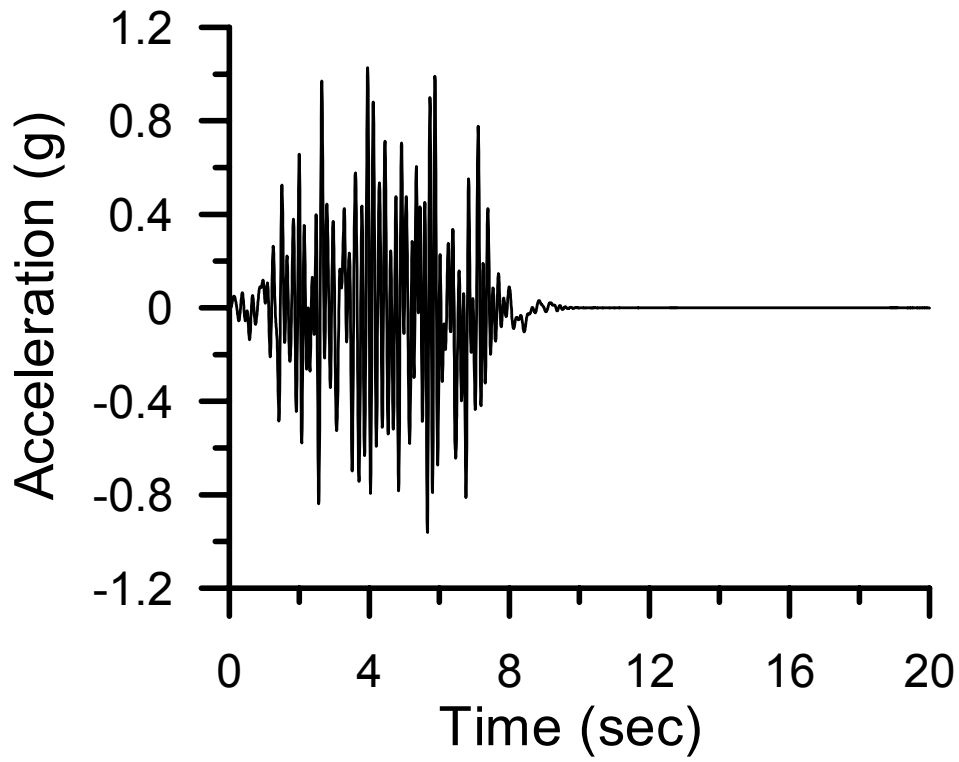
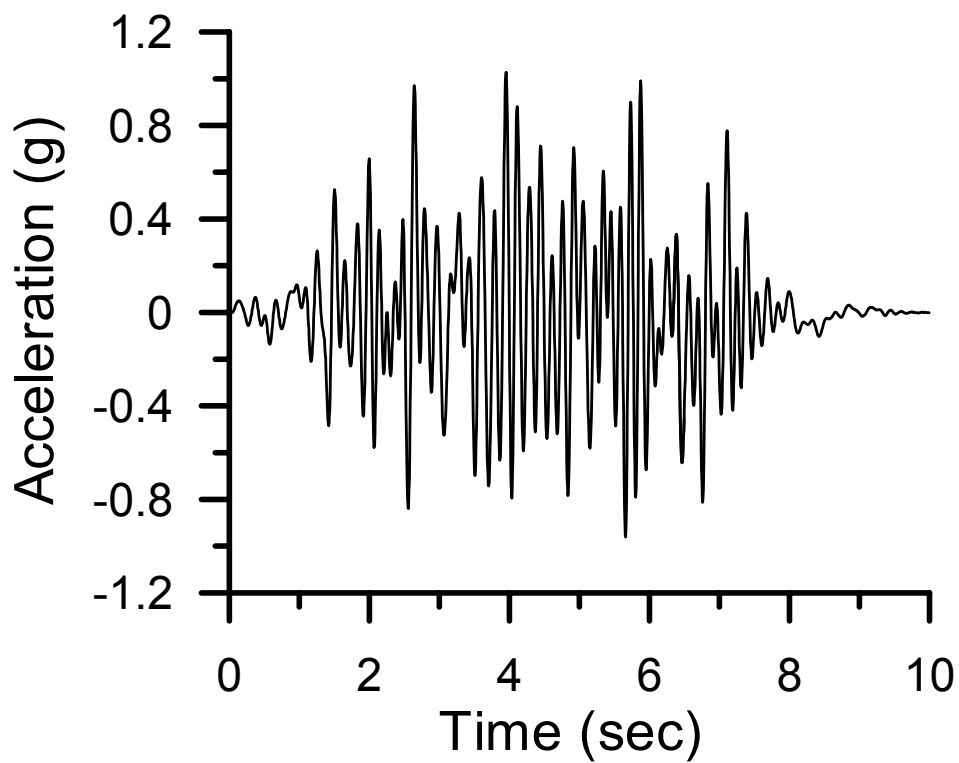


圖 4.2 HI-STORM 100[®] 示意圖(二)

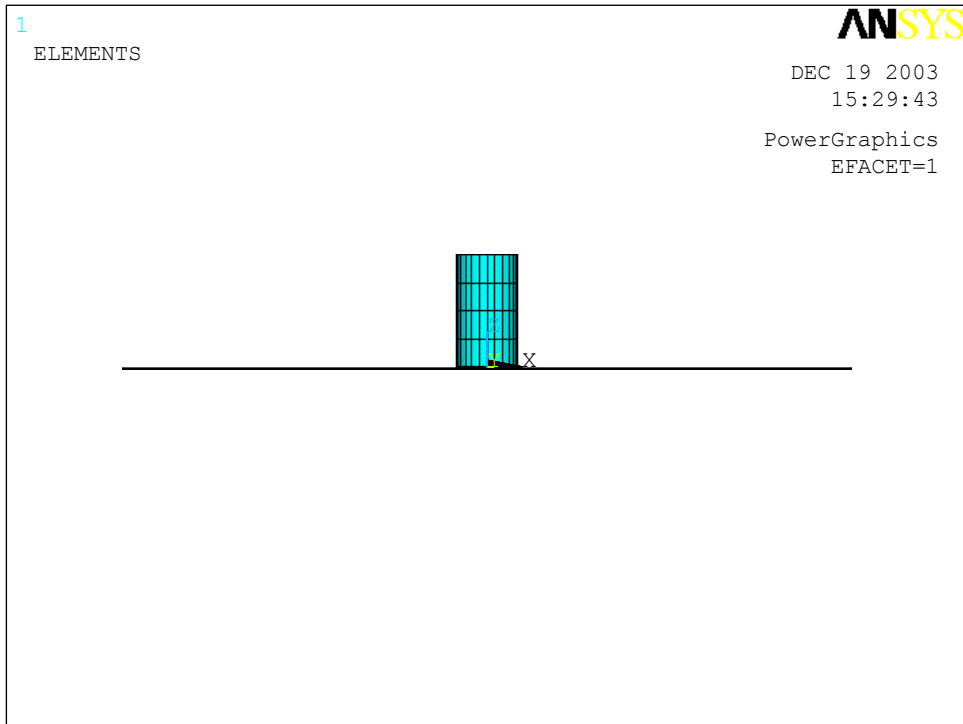


(a) 地震歷時圖-總作用時間

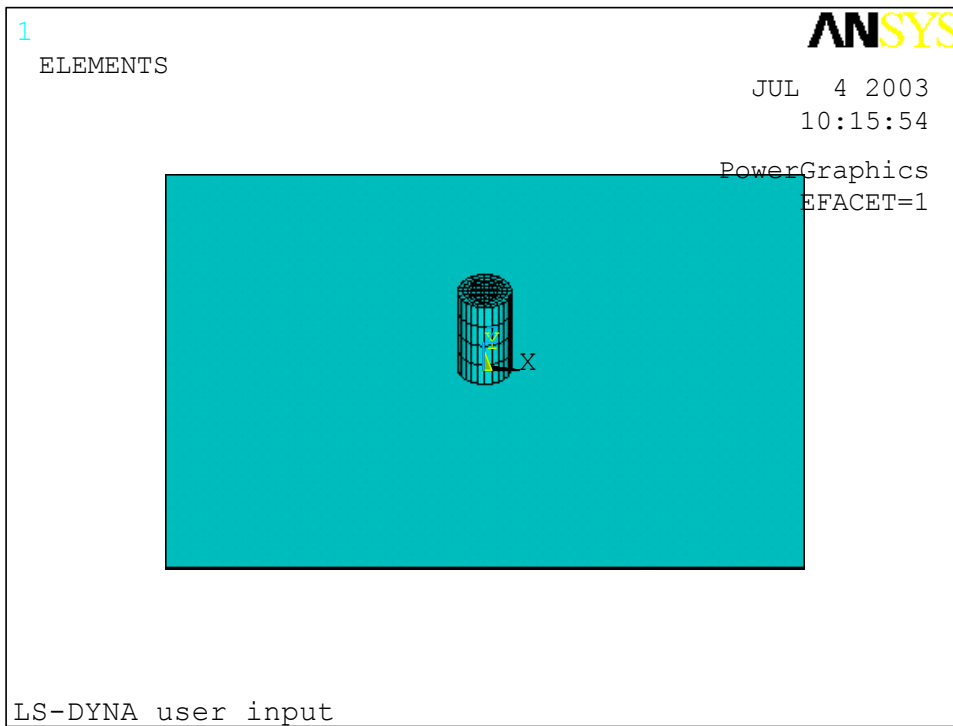


(a) 地震歷時圖-前 10 秒

圖 4.3 中期貯存設施貯存場地地震歷時圖

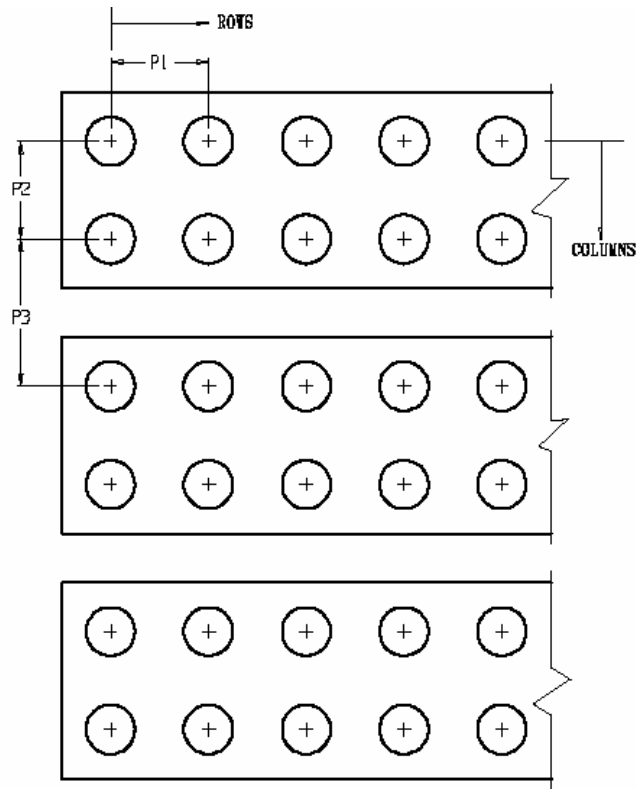


(a) 側視圖

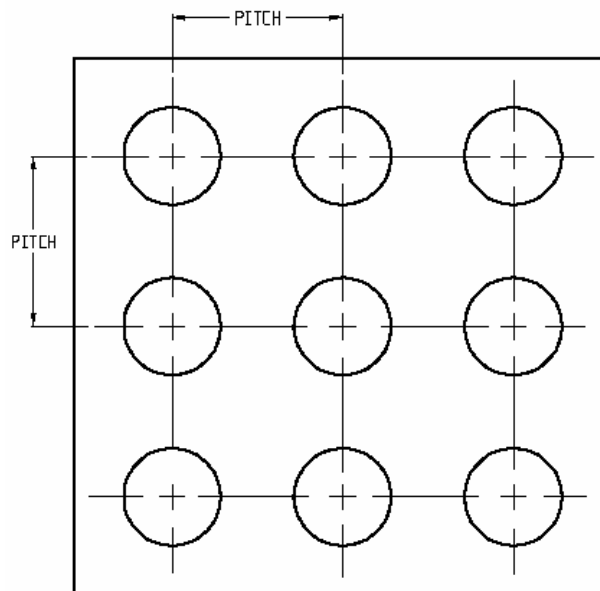


(b) 斜視圖

圖 4.4 HI-STORM 100[®] 滑動和翻覆有限元素分析模型

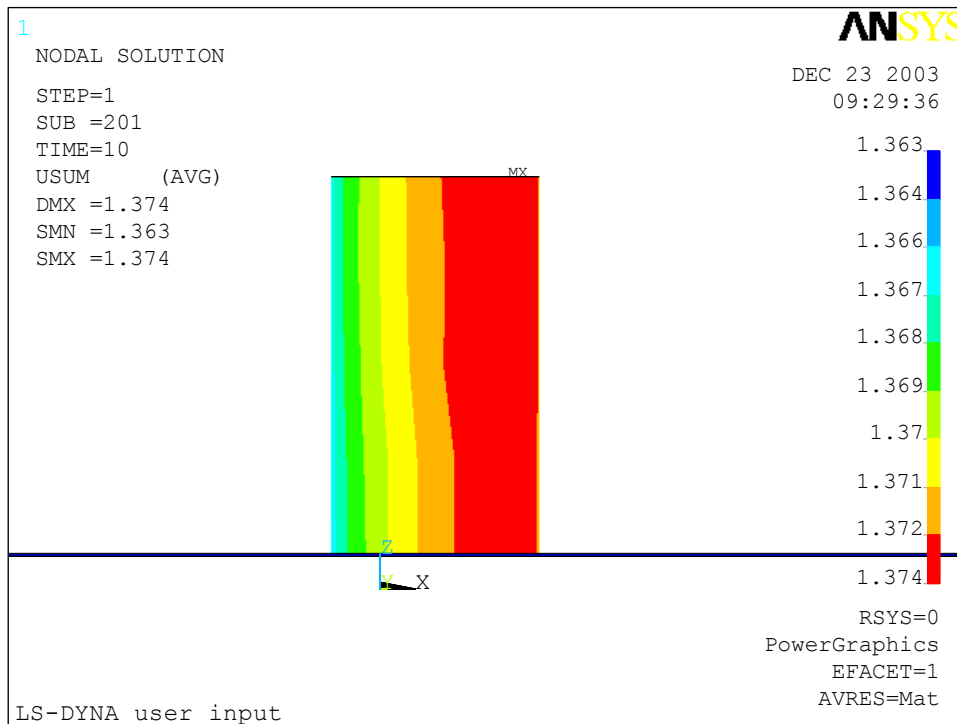


$P1 = P2 = 4114.8 \text{ mm}$, $P3 = 11582 \text{ mm}$ ($P1 = P2 = 13.5'$, $P3 = 38'$)
 (a) $2 \times N$ 排列

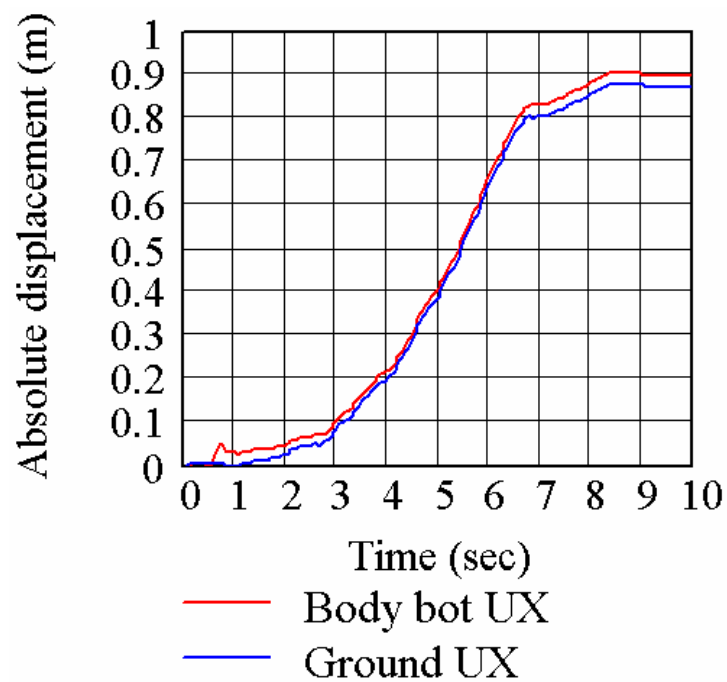


$P = 5689.6 \text{ mm}$ ($P = 18'-8''$)
 (b) $N \times N$ 排列

圖 4.5 HI-STORM 100[®] 貯存設施標準排列示意圖

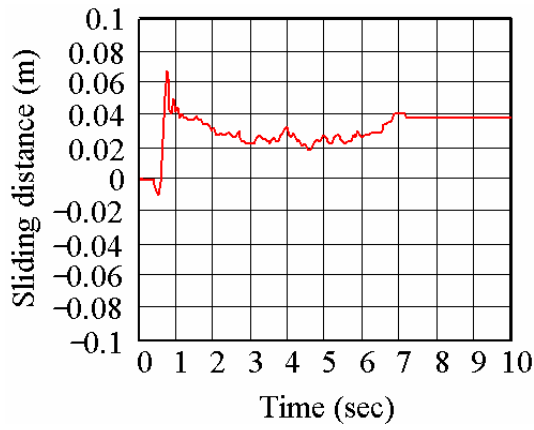


(a) 地震作用終了狀態

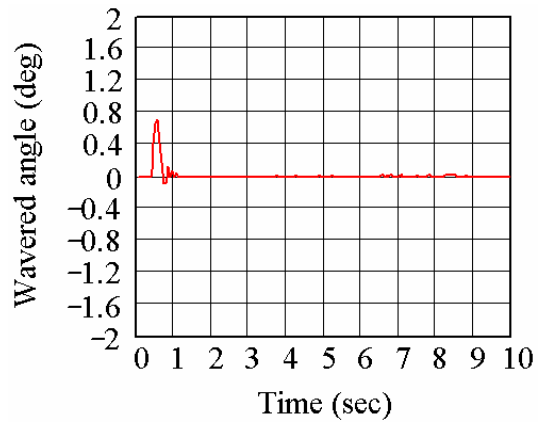


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

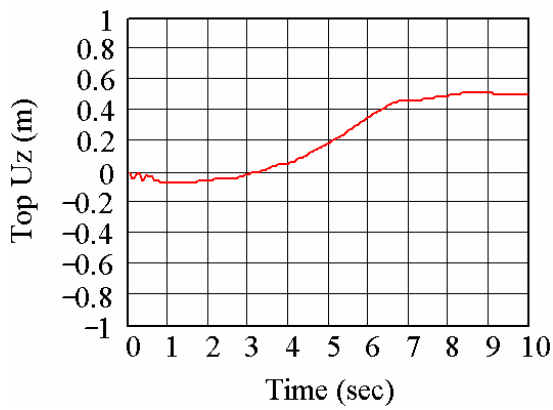
圖 4.6 HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況



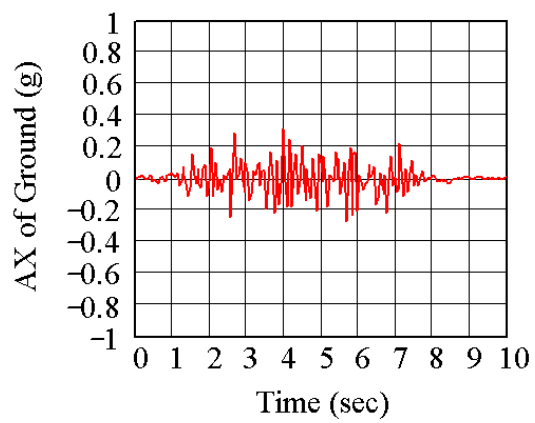
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

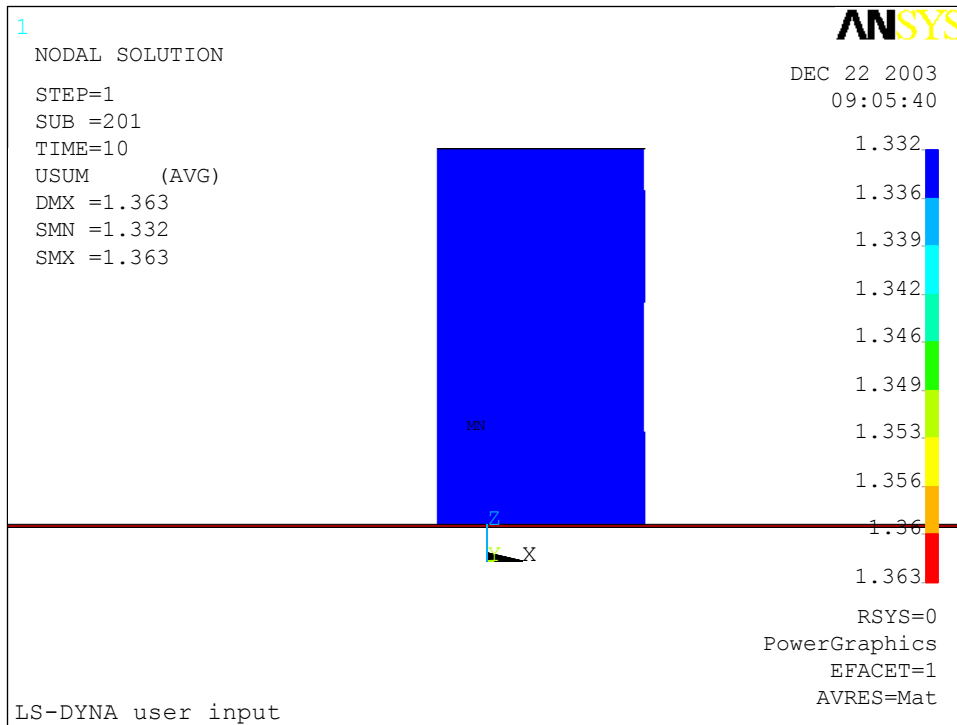


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

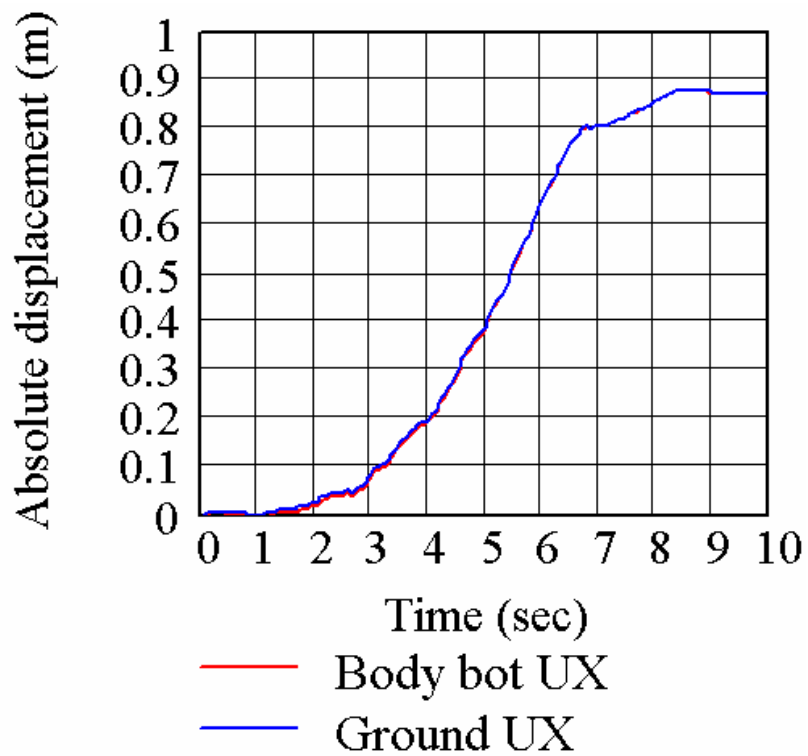


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.6(續) HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況

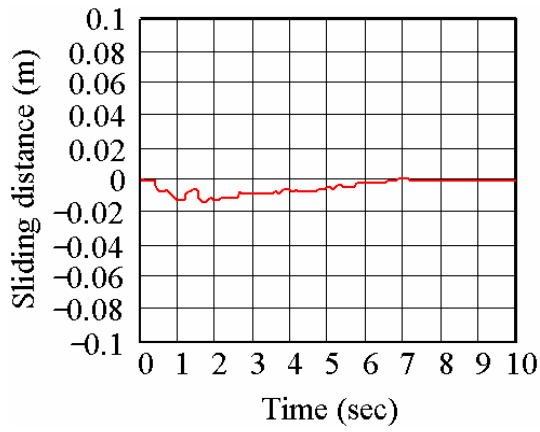


(a) 地震作用終了狀態

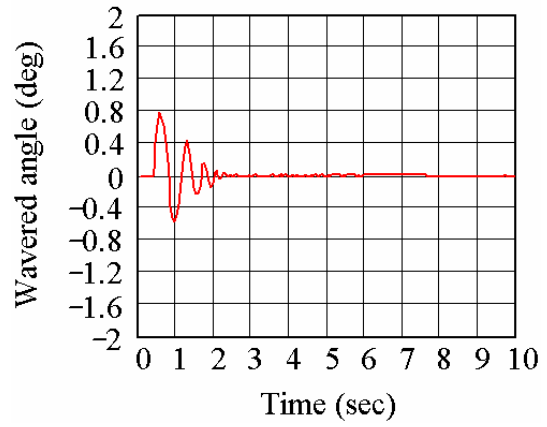


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

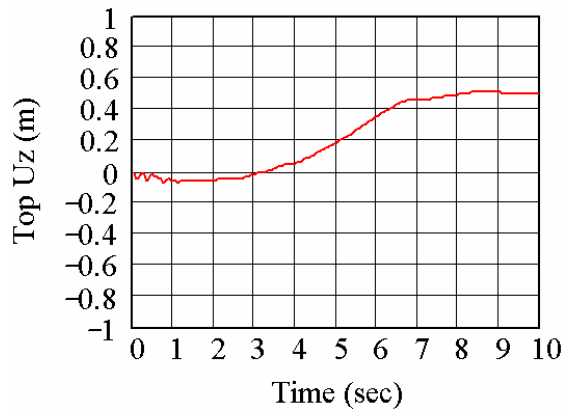
圖 4.7 HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 0.3 g$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況



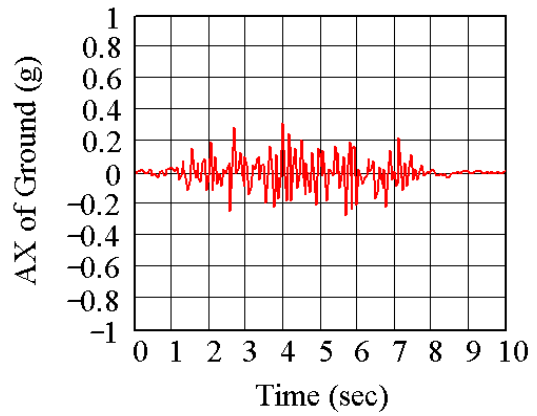
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

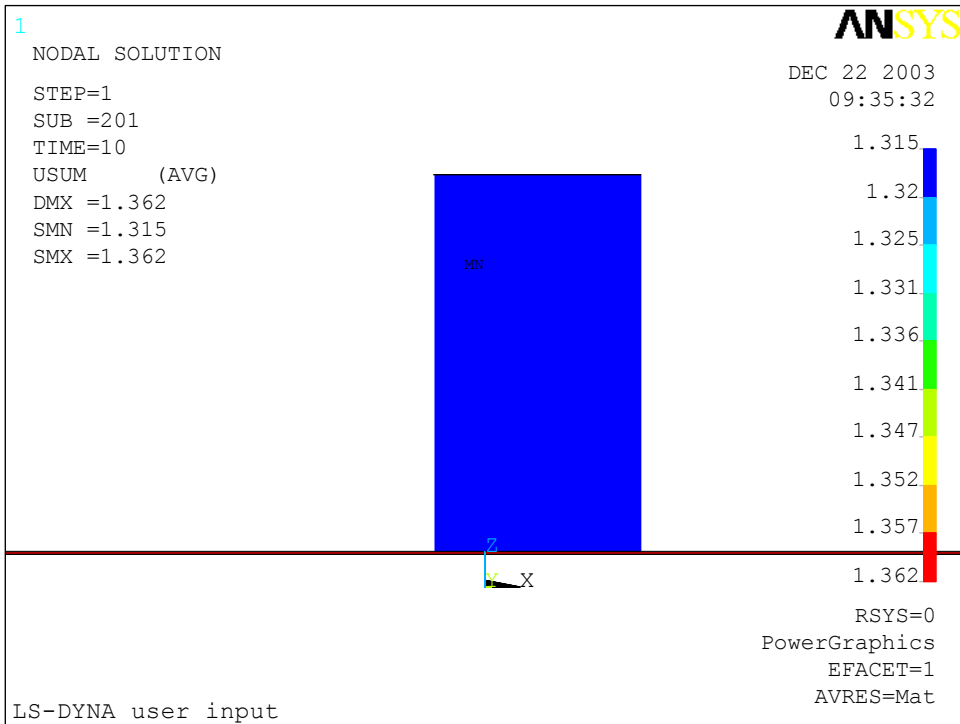


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

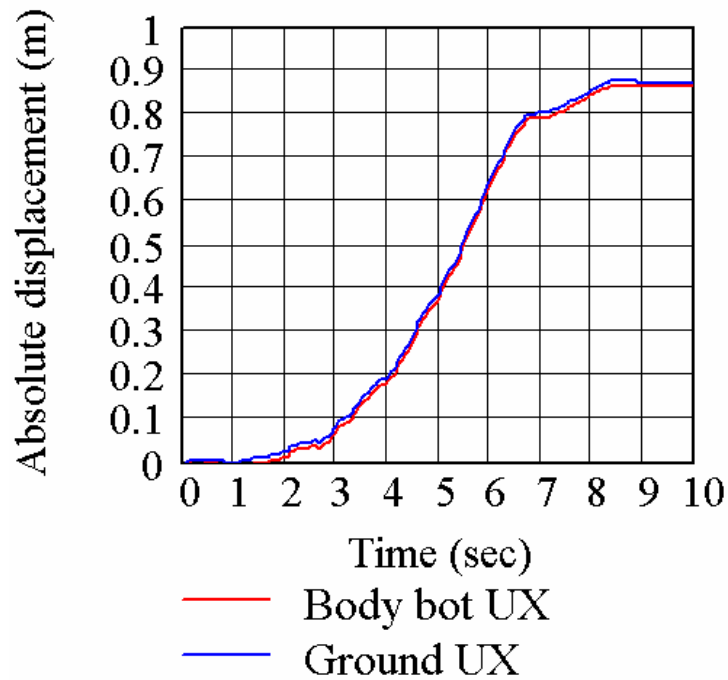


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.7(續) HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況

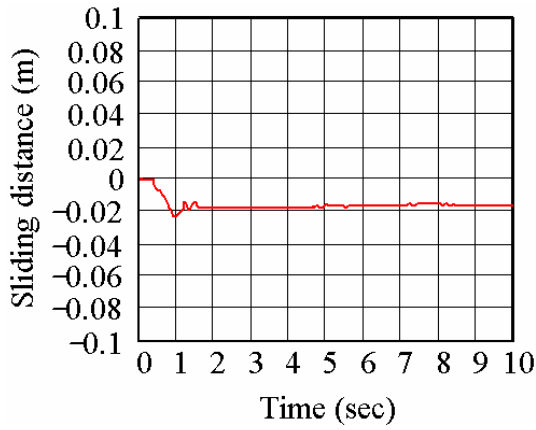


(a) 地震作用終了狀態

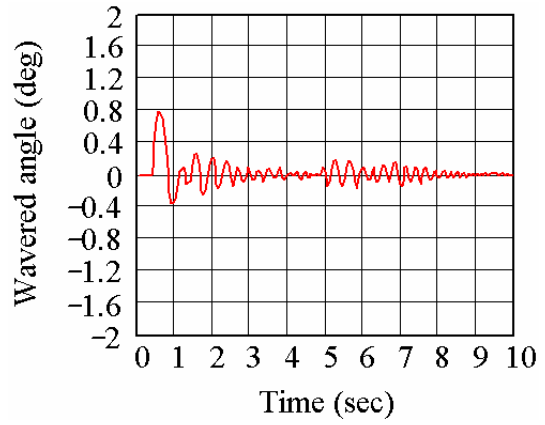


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

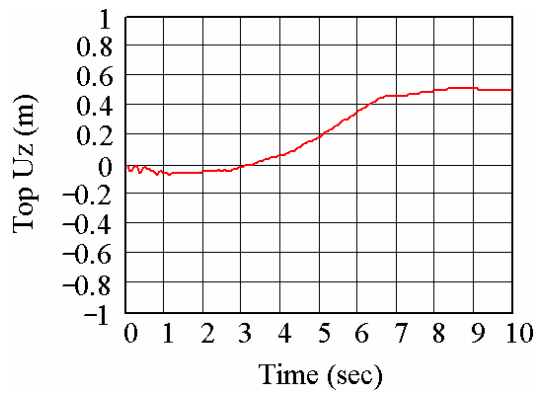
圖 4.8 HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 0.3 g$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況



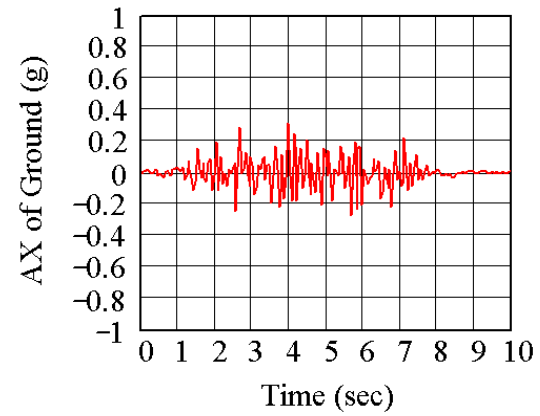
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

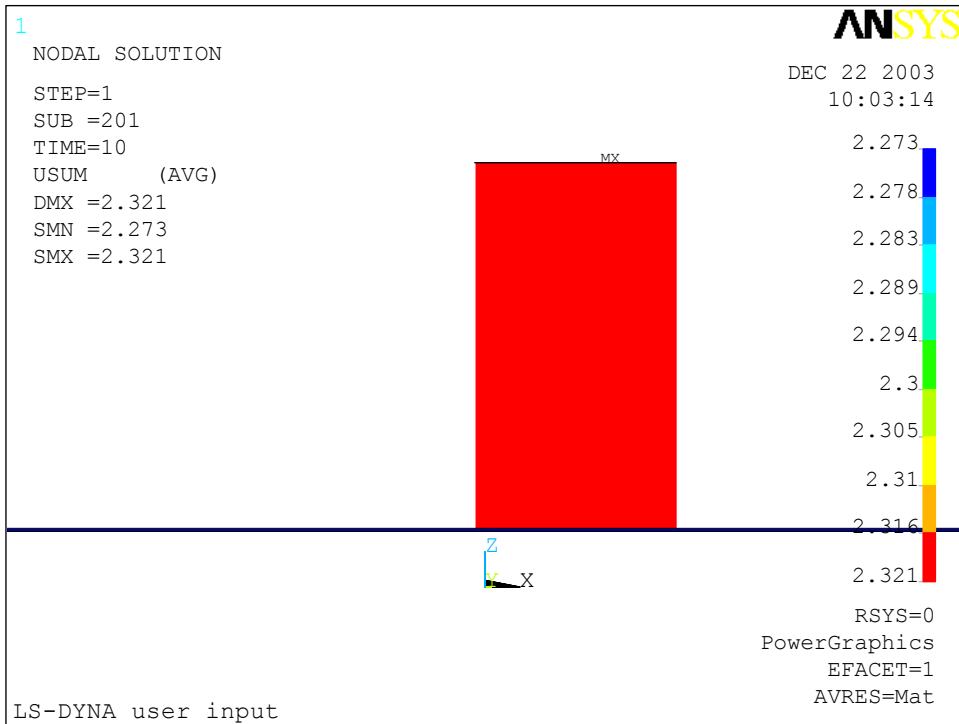


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

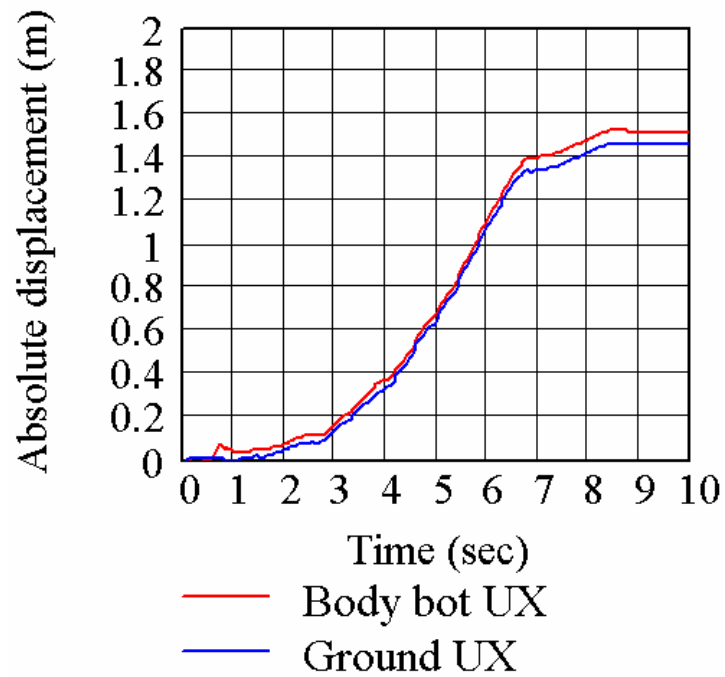


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.8(續) HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.3 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況

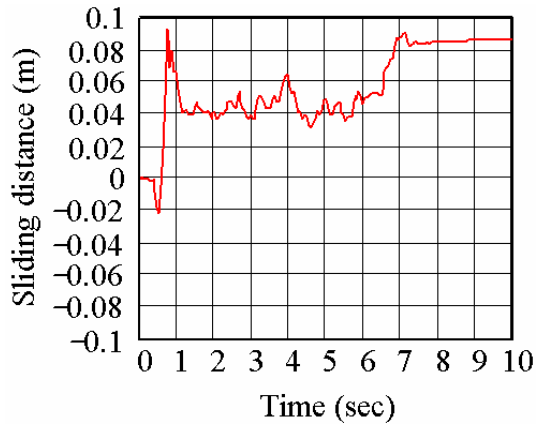


(a) 地震作用終了狀態

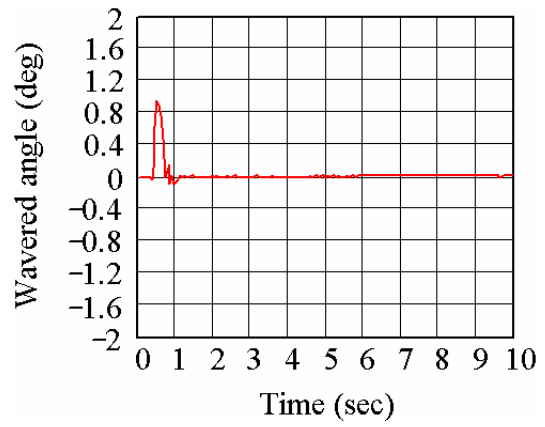


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

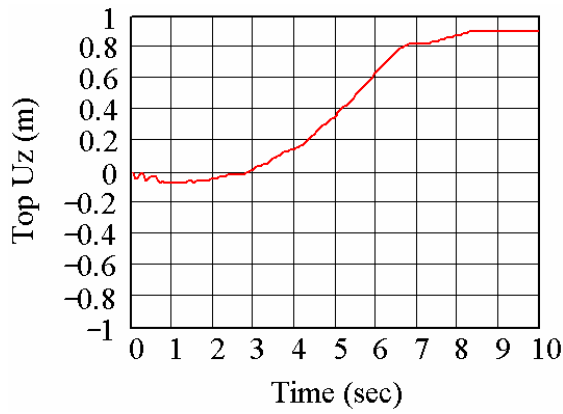
圖 4.9 HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 0.5 g$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況



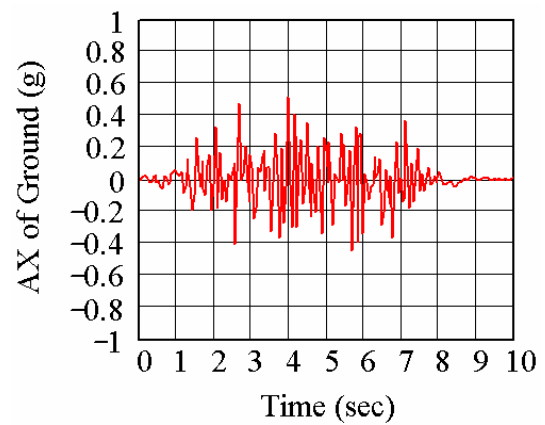
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

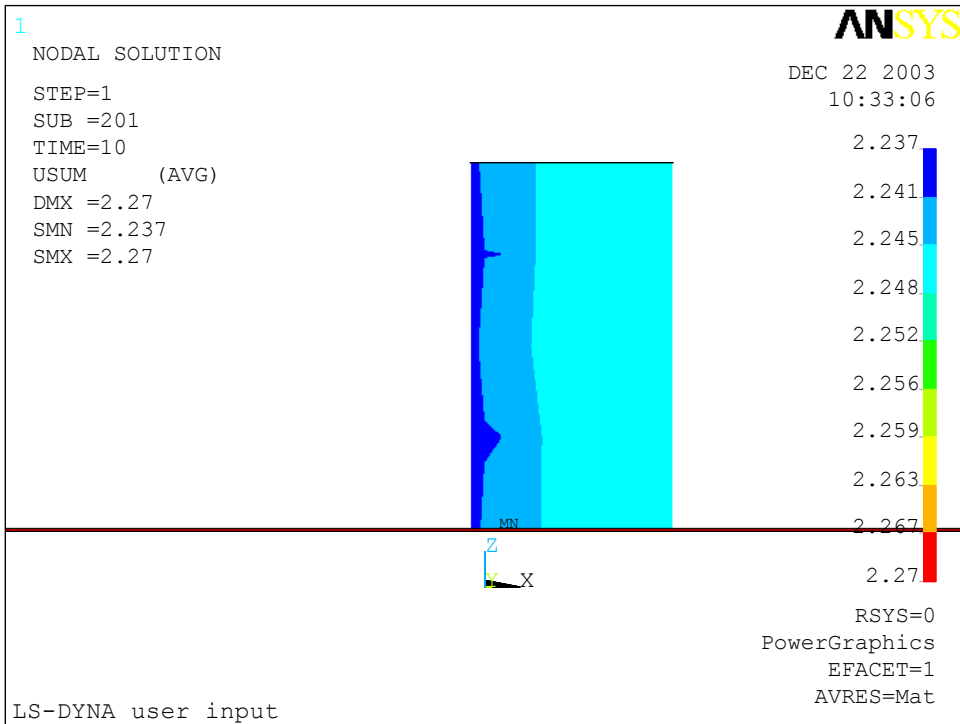


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

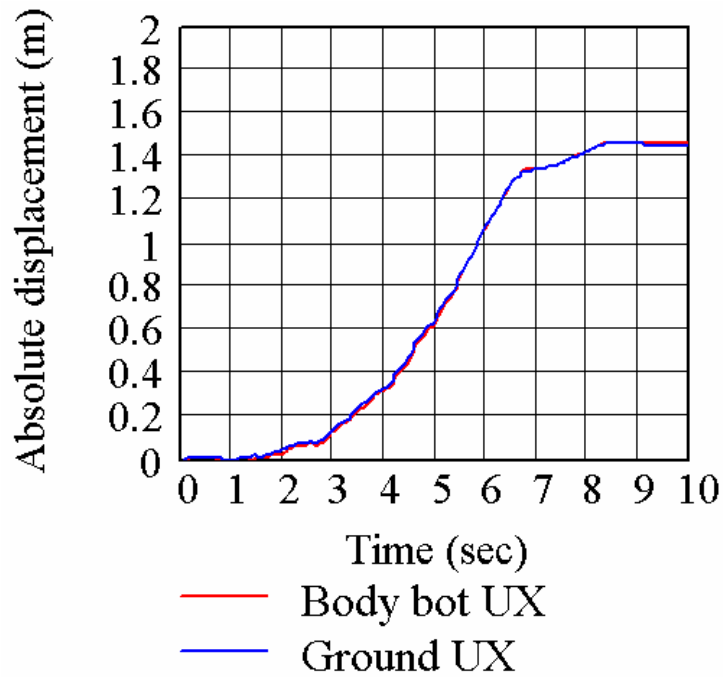


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.9(續) HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況

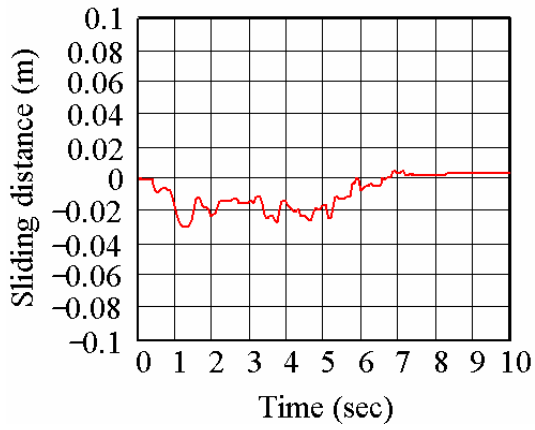


(a) 地震作用終了狀態

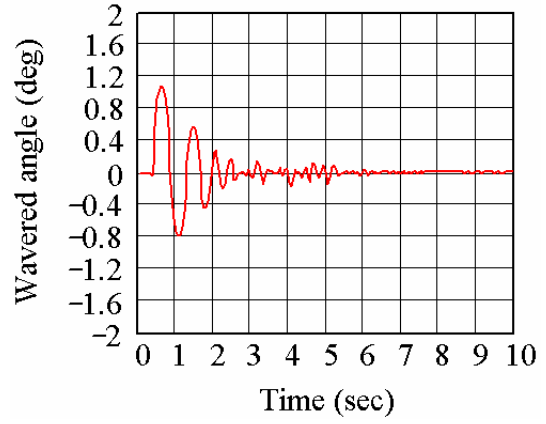


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

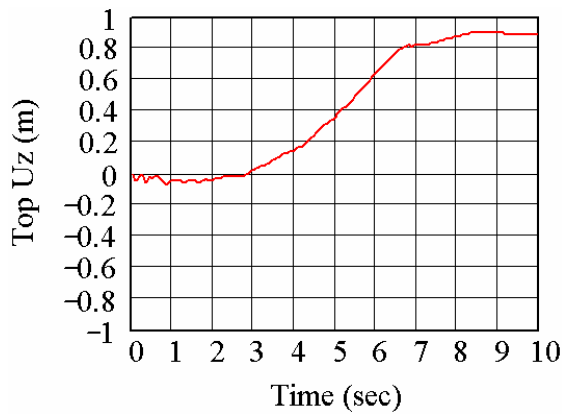
圖 4.10 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況



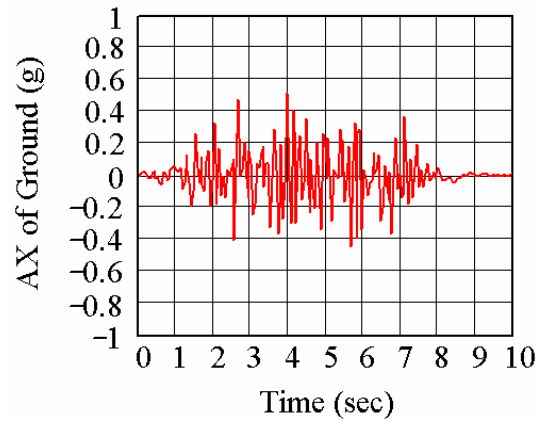
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

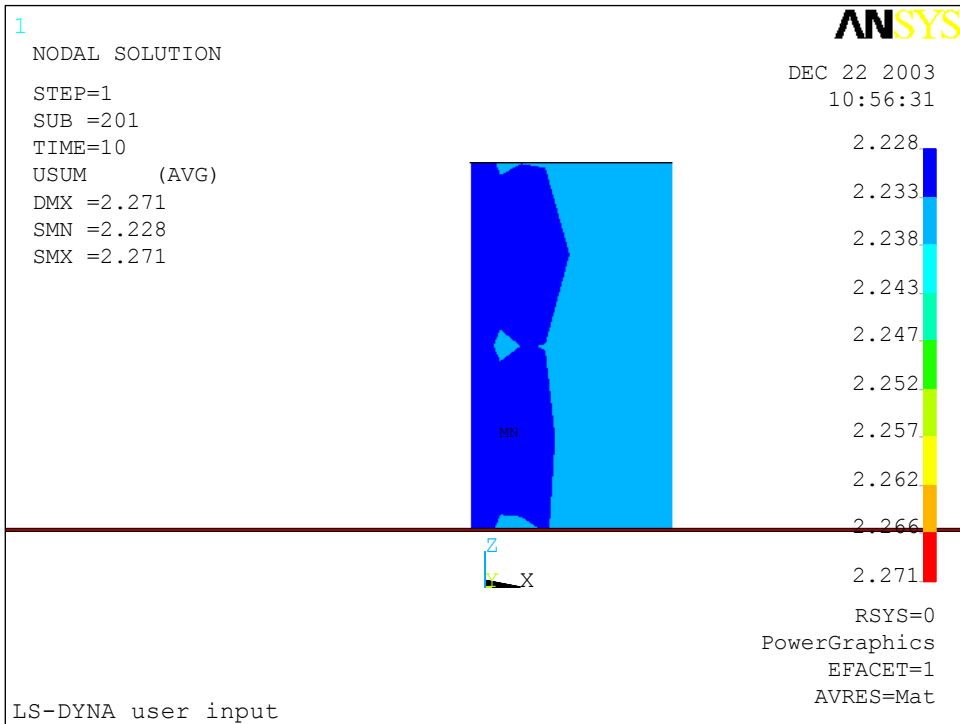


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

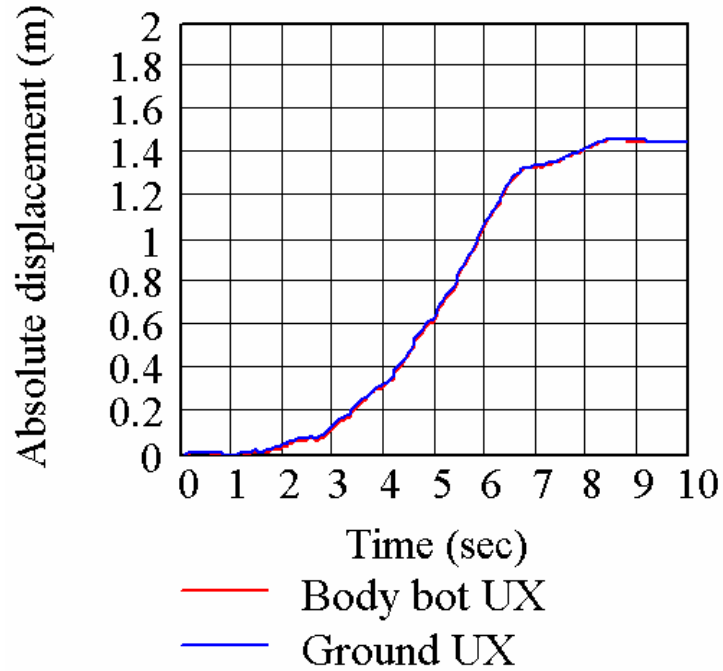


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.10(續) HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況

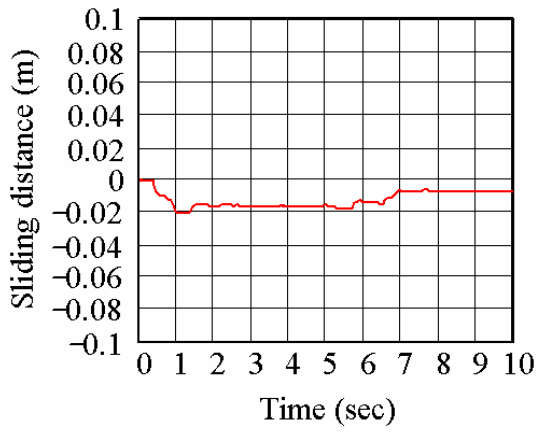


(a) 地震作用終了狀態

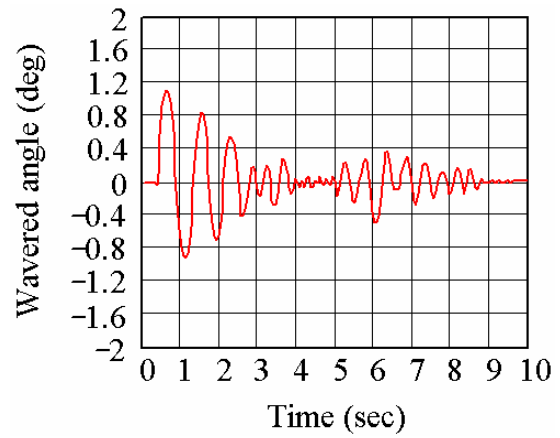


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

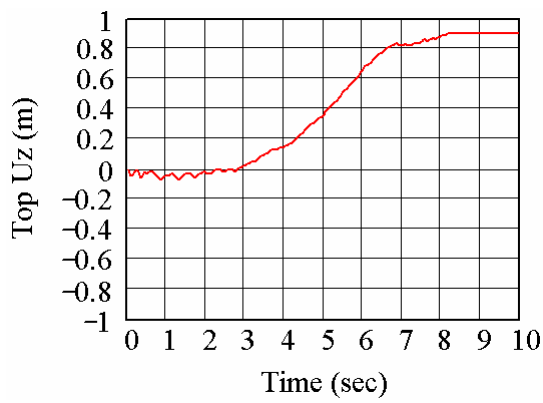
圖 4.11 HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 0.5 g$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況



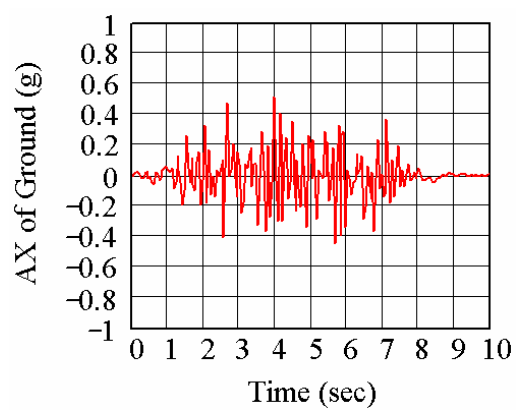
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

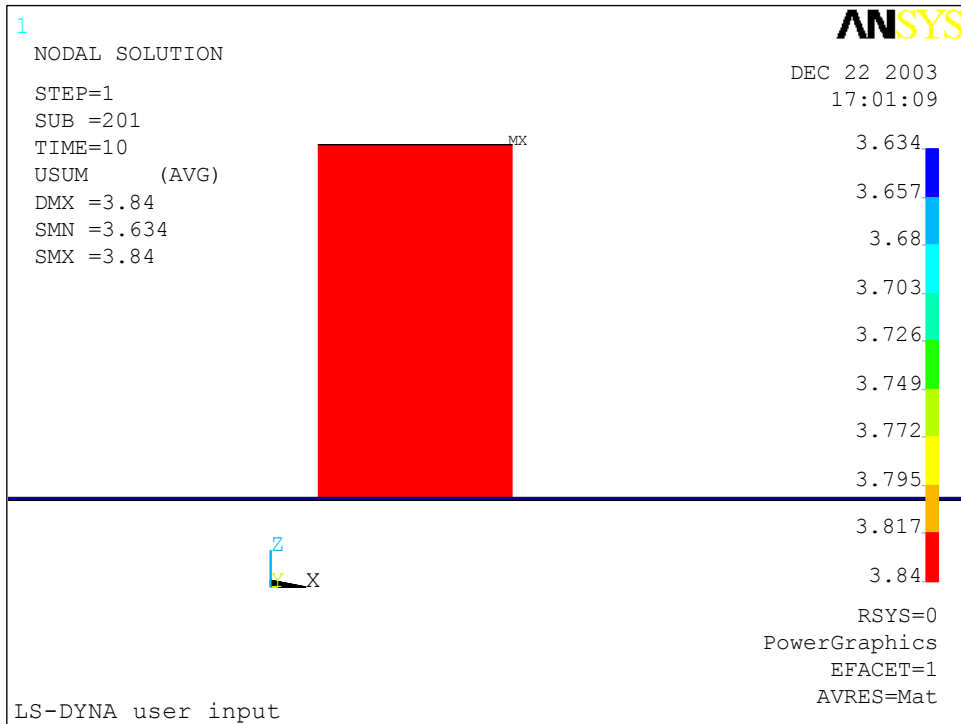


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

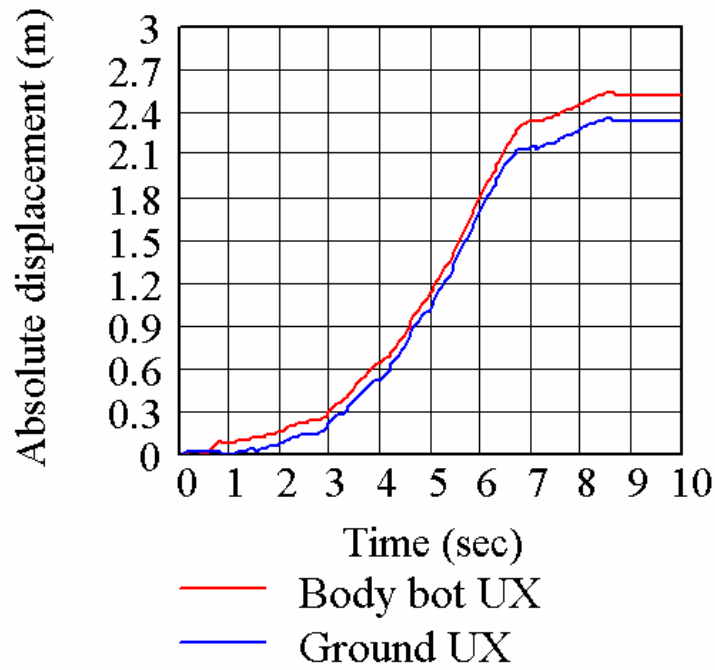


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.11(續) HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 0.5 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況

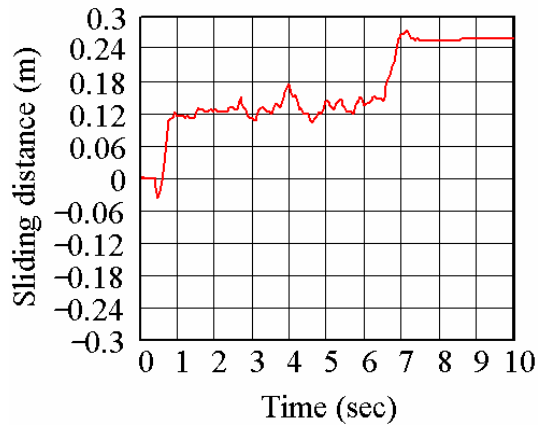


(a) 地震作用終了狀態

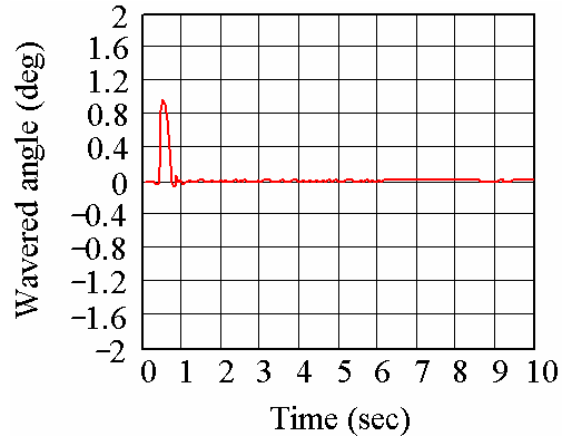


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

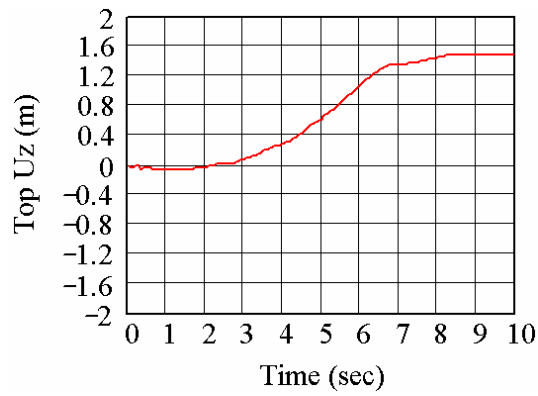
圖 4.12 HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況



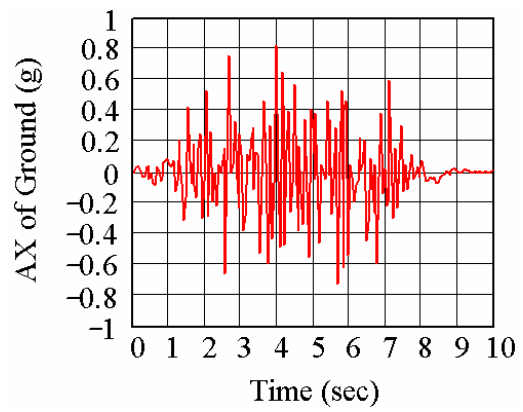
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

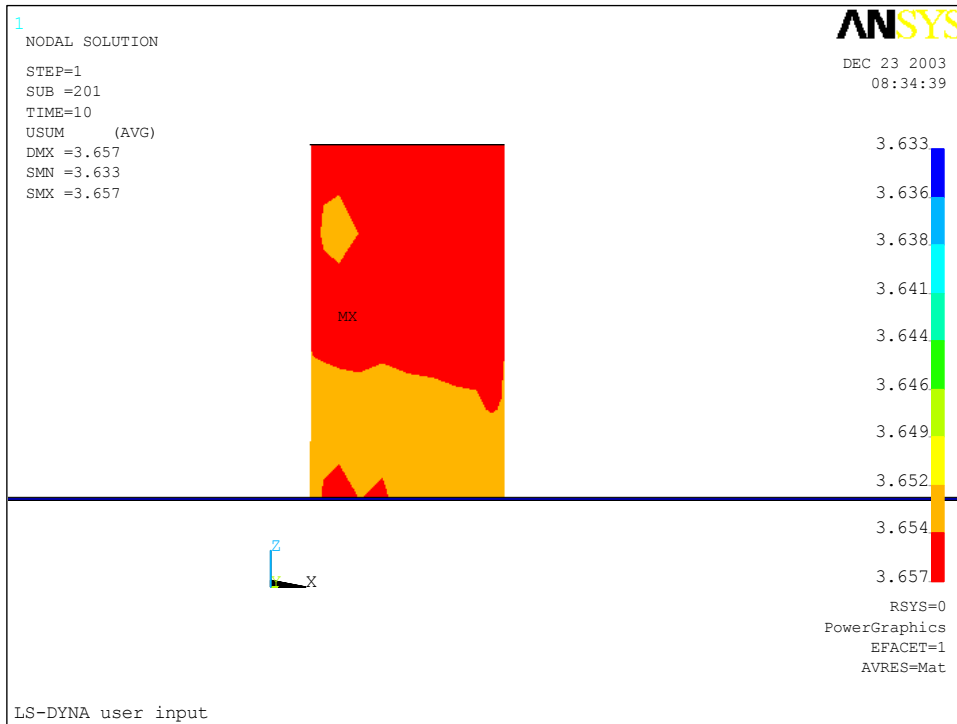


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

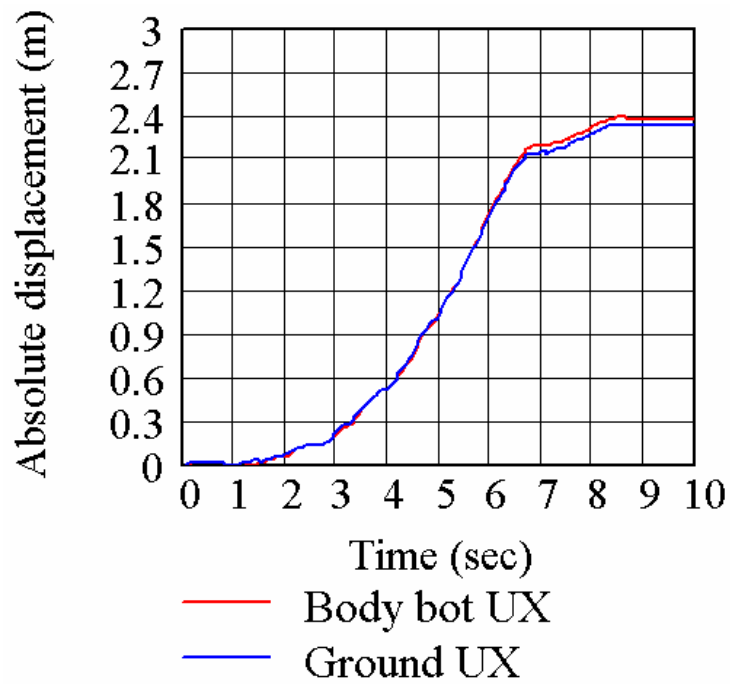


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.12(續) HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況

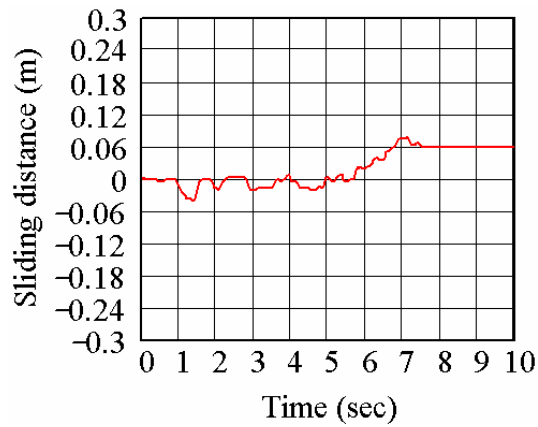


(a) 地震作用終了狀態

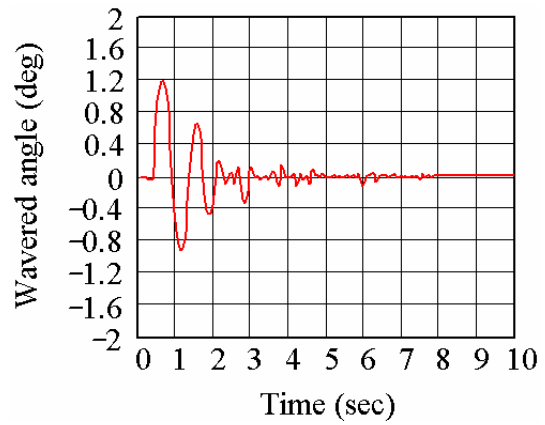


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

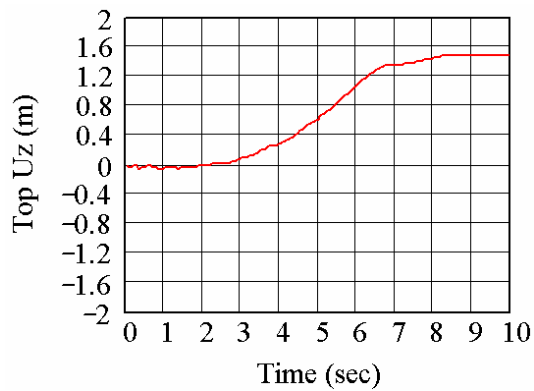
圖 4.13 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 g$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況



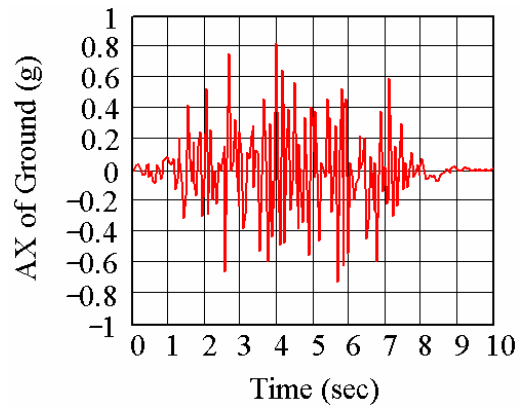
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

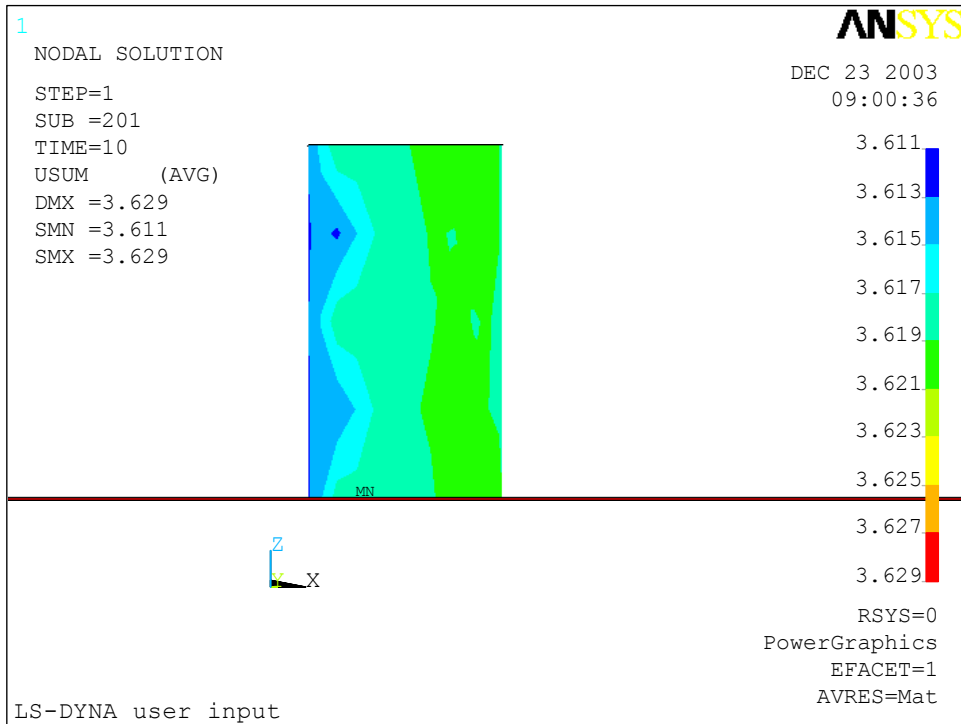


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

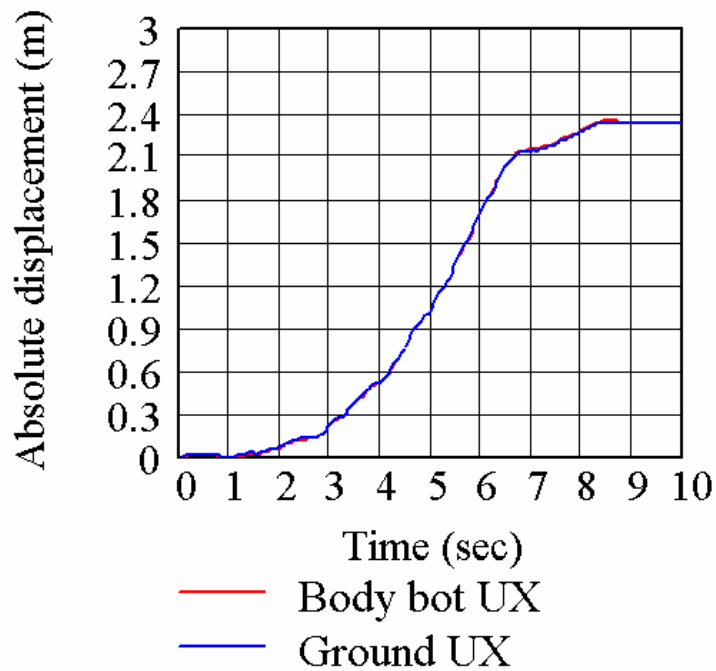


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.13(續) HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 0.8\text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況

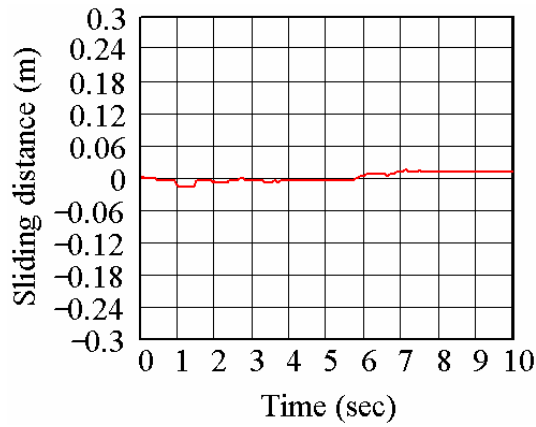


(a) 地震作用終了狀態

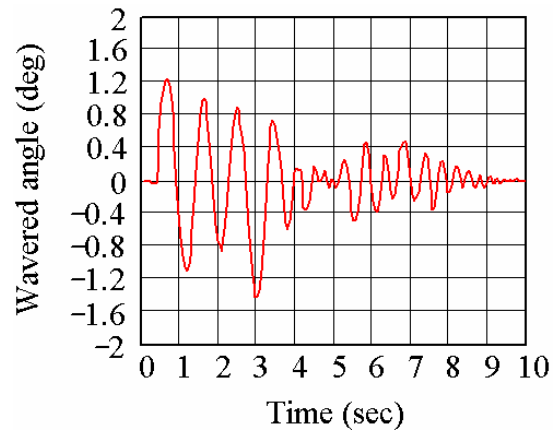


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

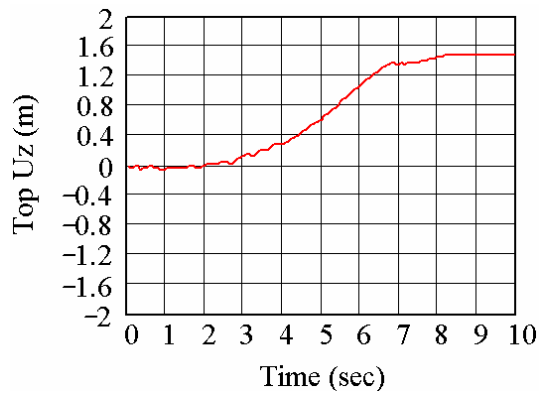
圖 4.14 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 g$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況



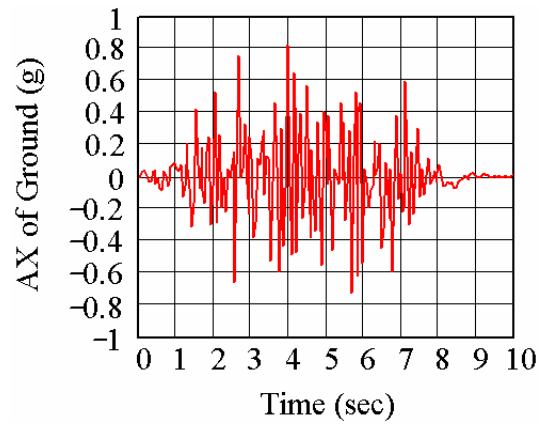
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

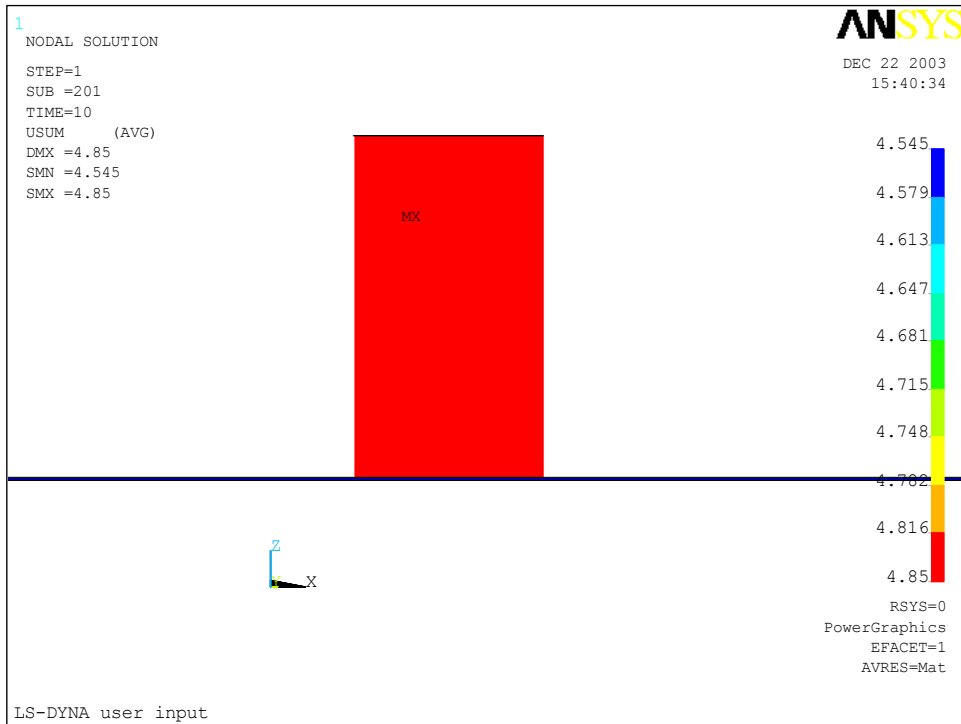


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

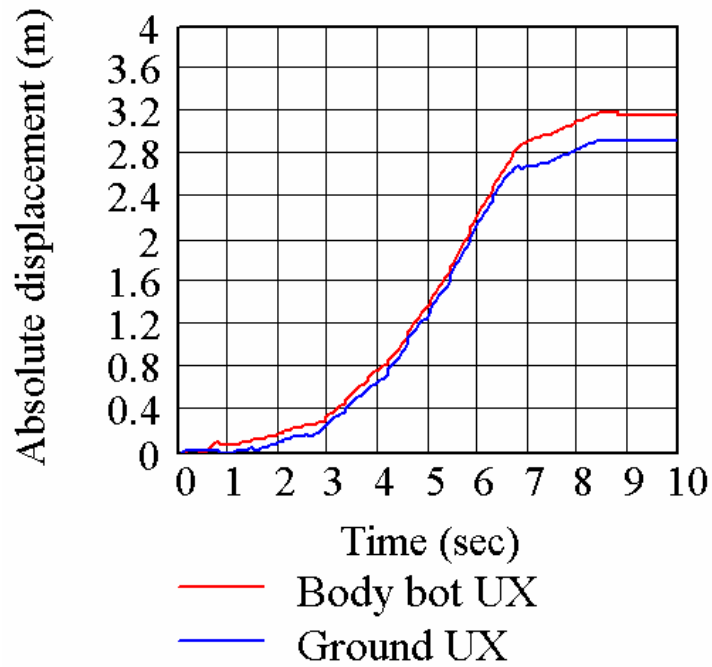


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.14(續) HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 0.8 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況

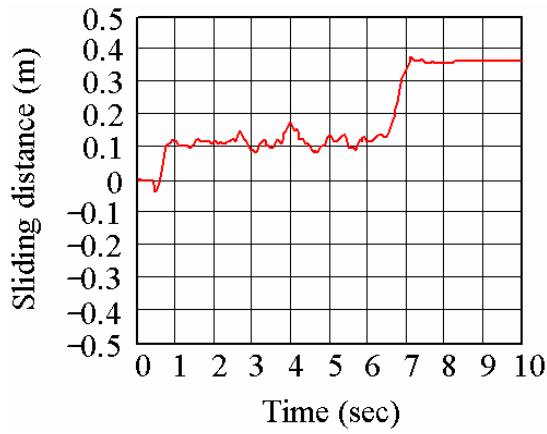


(a) 地震作用終了狀態

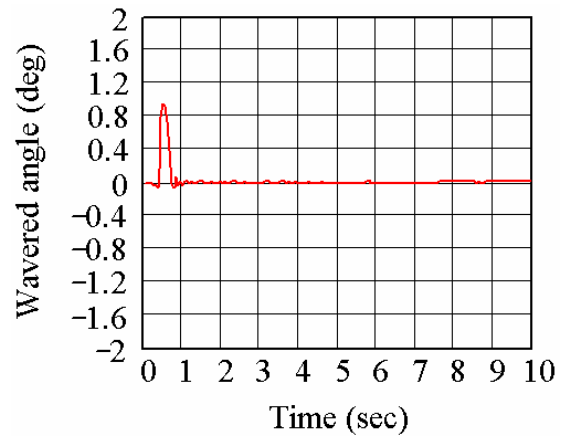


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

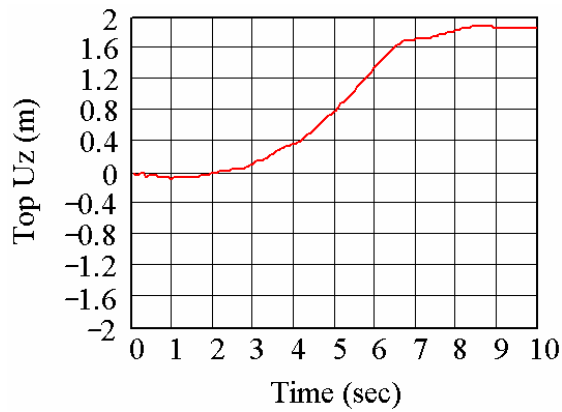
圖 4.15 HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 1.0 g$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況



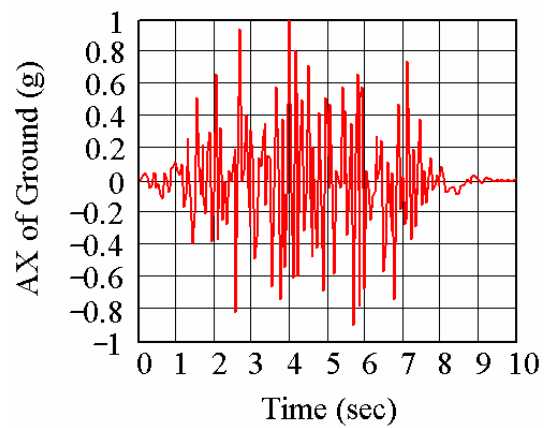
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

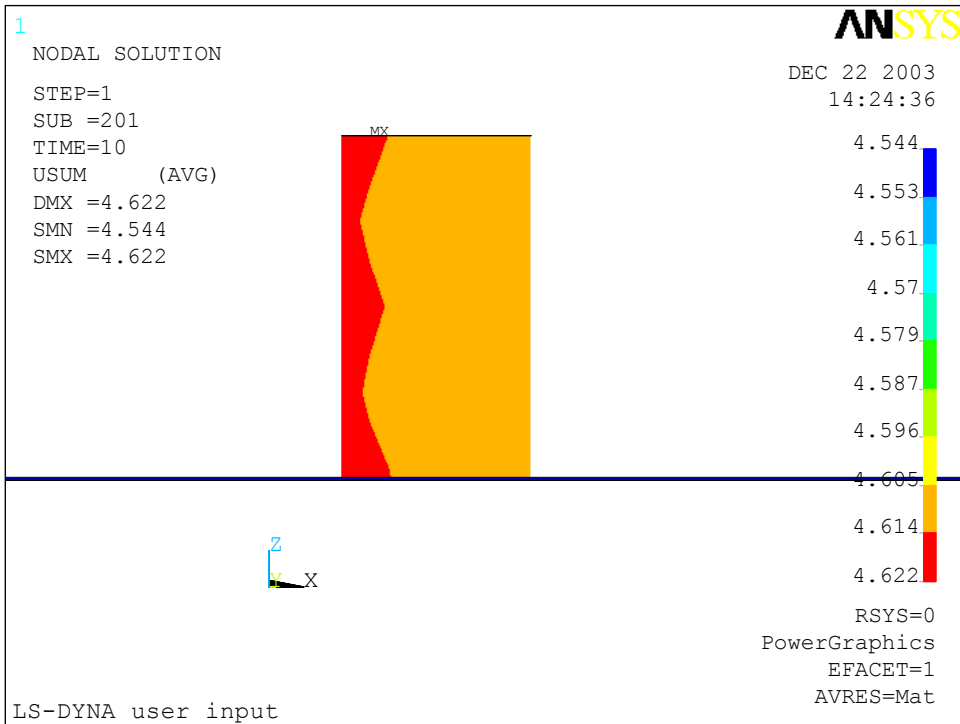


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

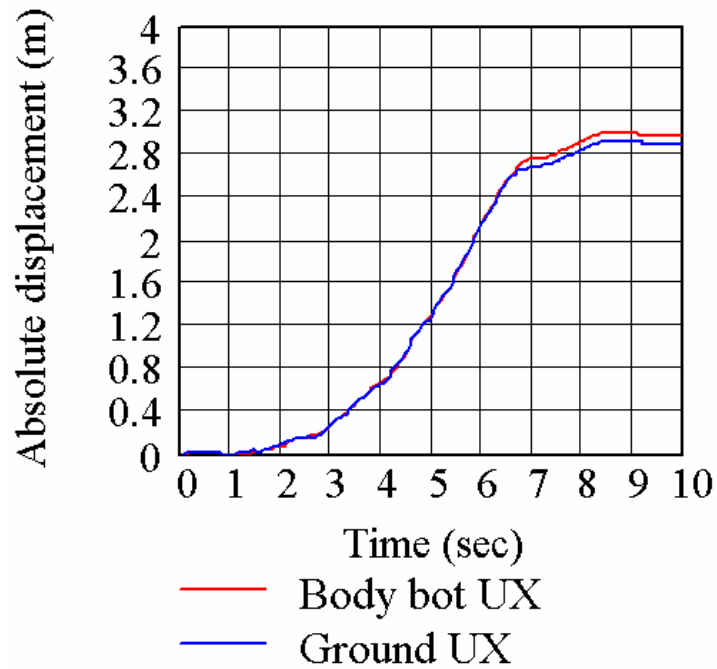


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.15(續) HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 1.0\text{ g}$ 、 $\mu = 0.2$ 分析情況

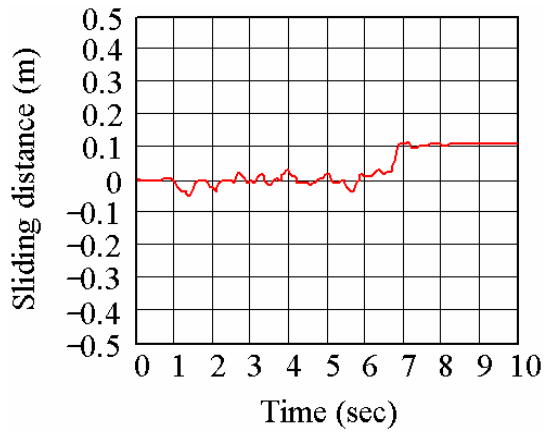


(a) 地震作用終了狀態

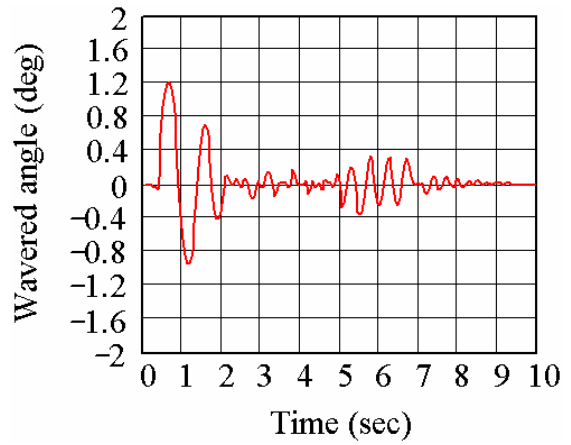


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

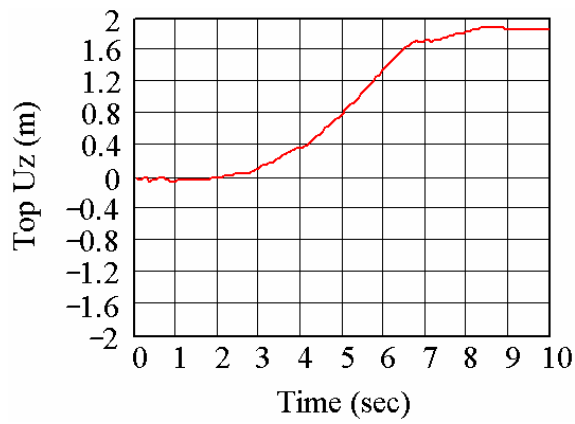
圖 4.16 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況



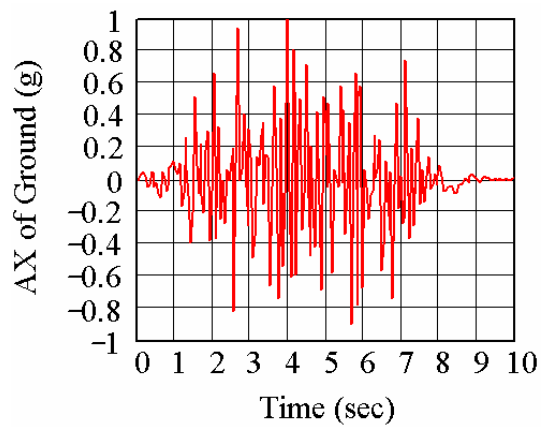
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖

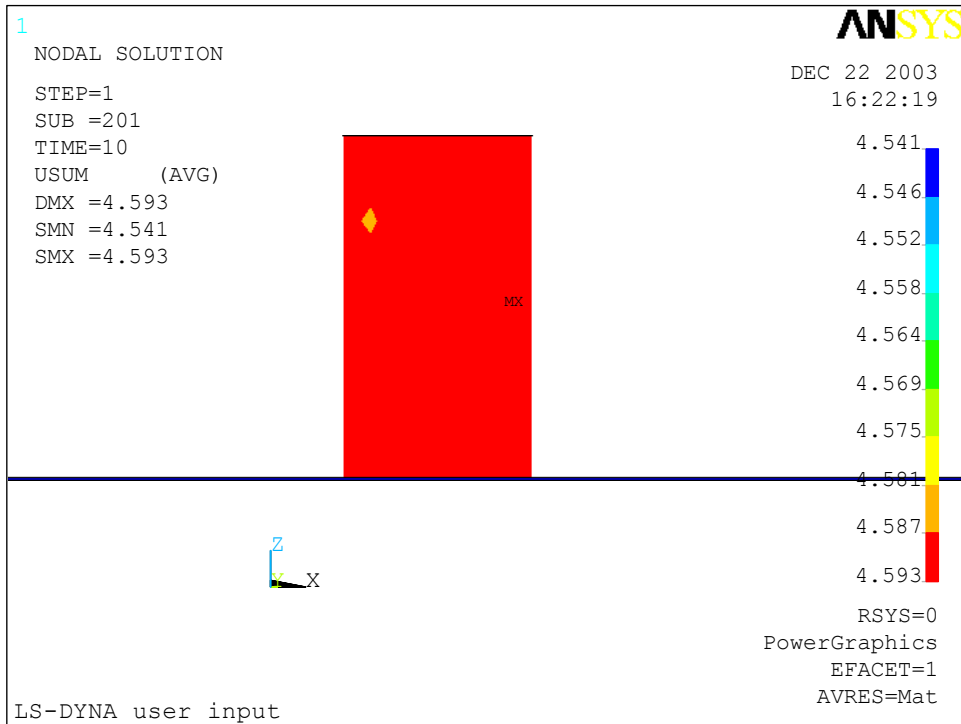


(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖

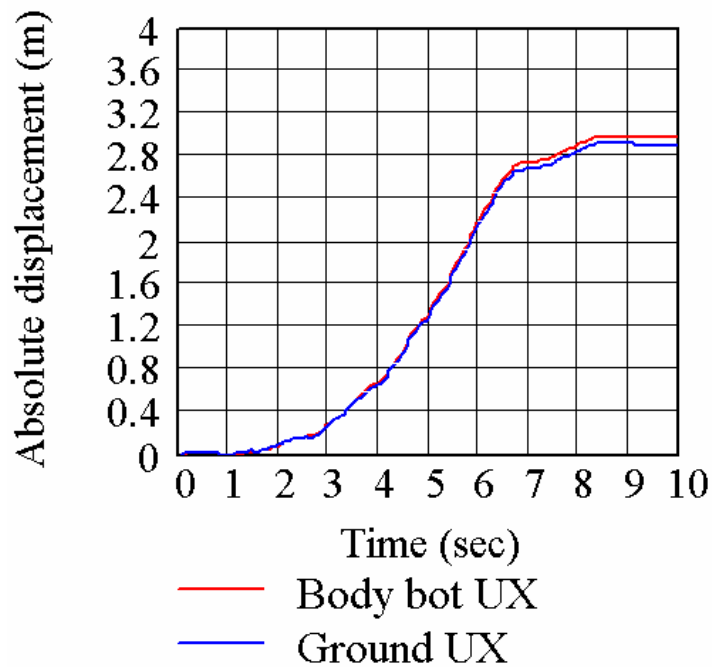


(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.16(續) HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.4$ 分析情況

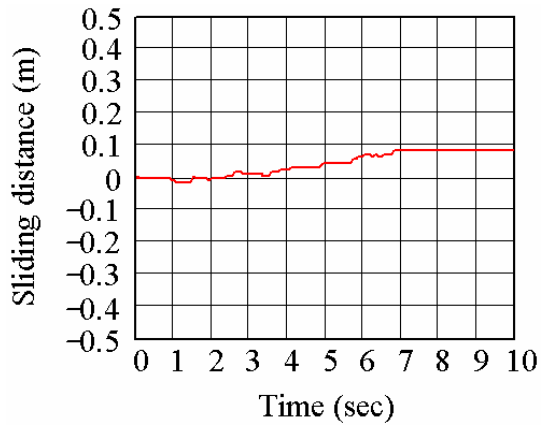


(a) 地震作用終了狀態

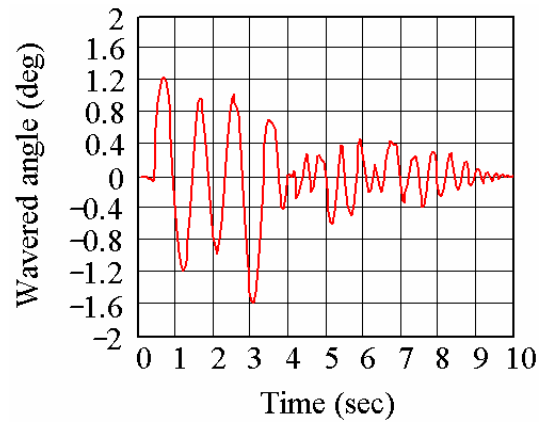


(b) 貯存設施底部和地表水平方向絕對位移歷時圖

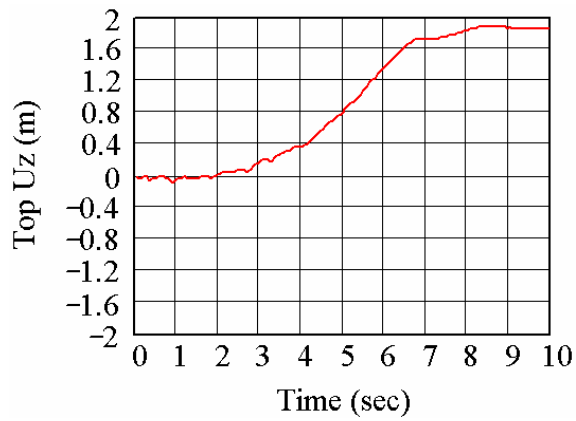
圖 4.17 HI-STORM 100[®] 貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況



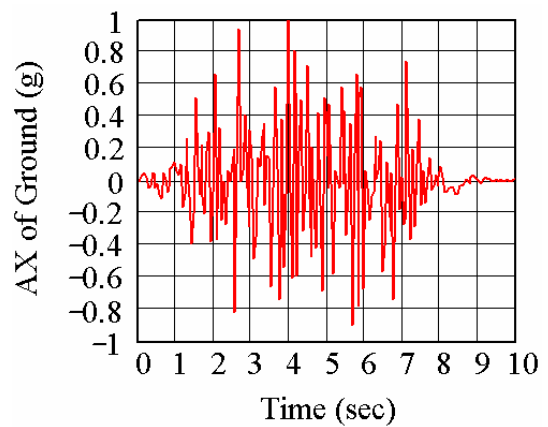
(c) 貯存設施滑動距離歷時圖



(d) 貯存設施傾斜歷時圖



(e) 貯存設施頂部中點 Uz 歷時圖



(f) 地表 AX 加速度歷時圖

圖 4.17(續) HI-STORM 100[®]貯存設施於 $a_h = 1.0 \text{ g}$ 、 $\mu = 0.6$ 分析情況

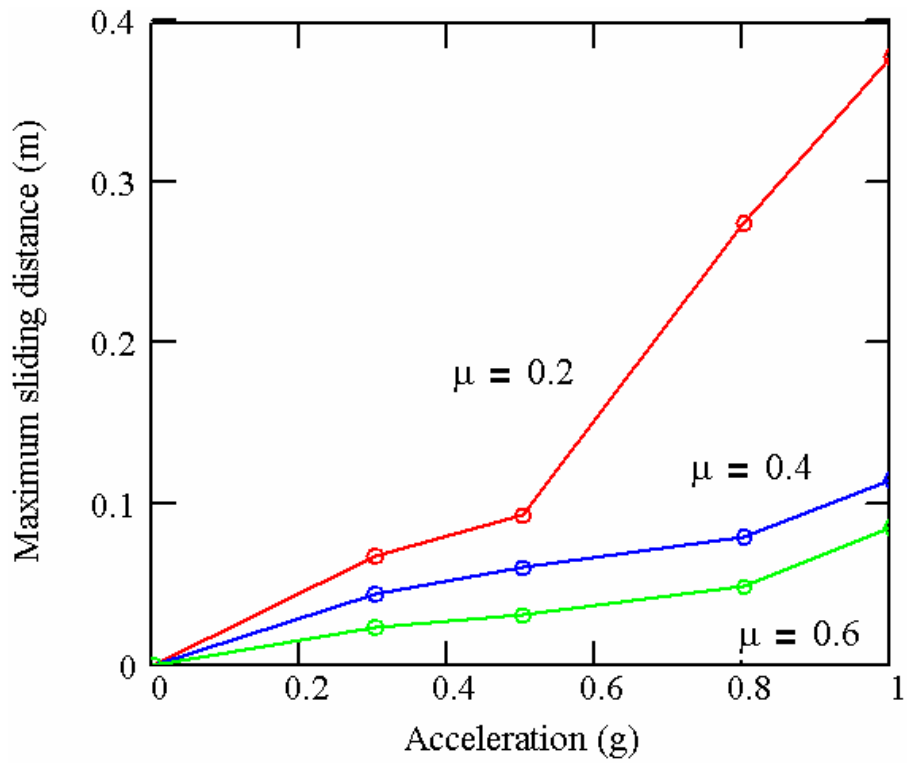


圖 4.18 HI-STORM 100[®]貯存設施於地震作用下滑動距離

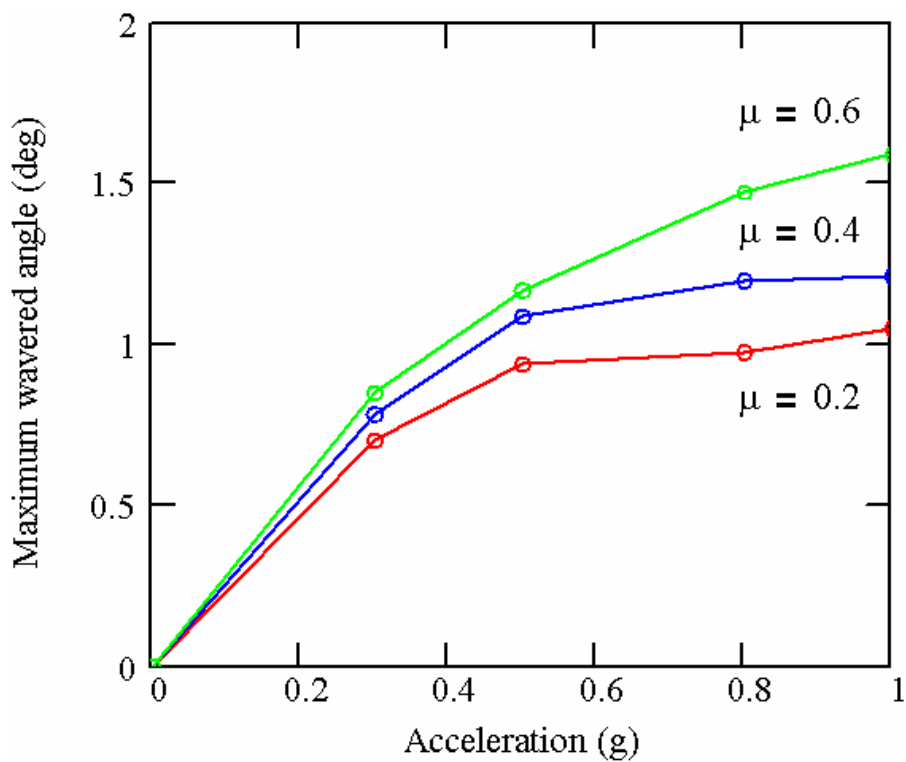


圖 4.19 HI-STORM 100[®]貯存設施於地震作用下傾斜角度

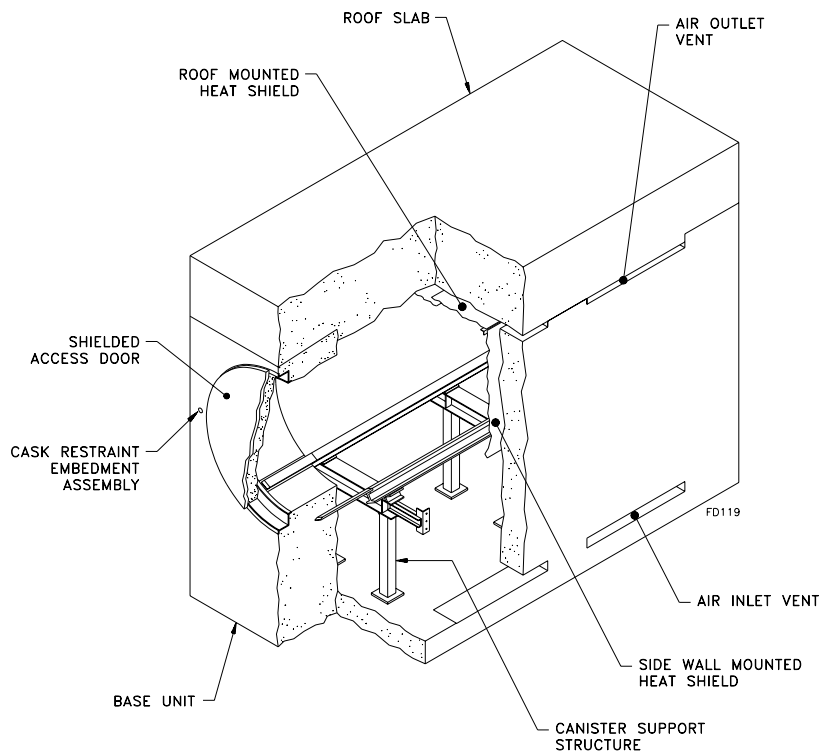


圖 5.1 NUHOMS[®] 貯存設施-水平貯存模組

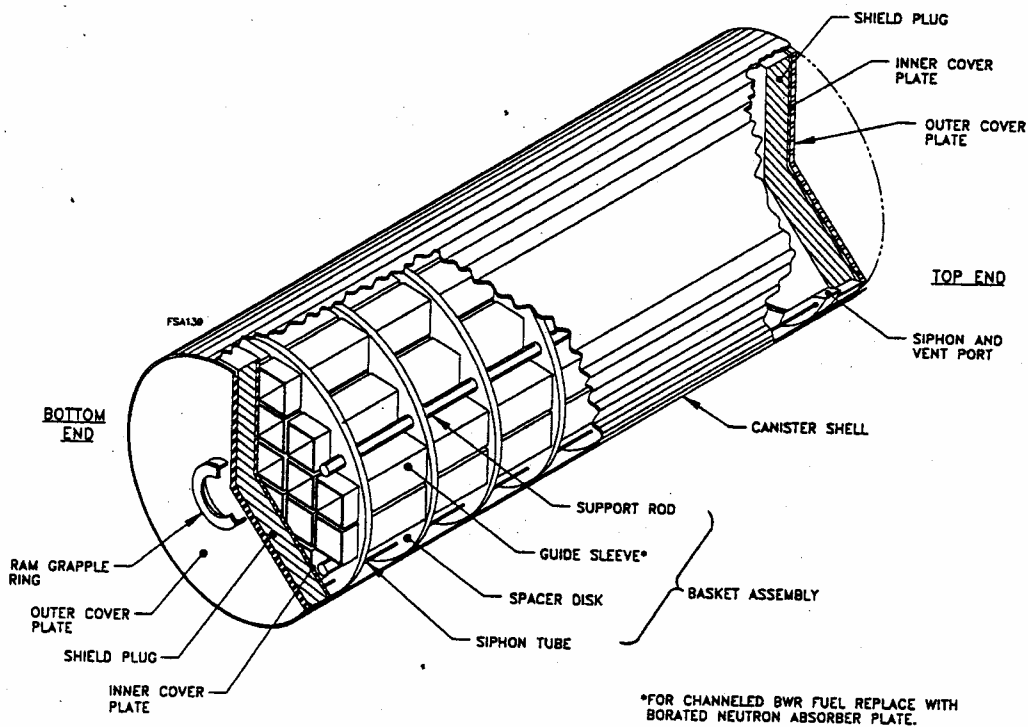


圖 5.2 NUHOMS[®] 貯存設施-乾式屏蔽罐

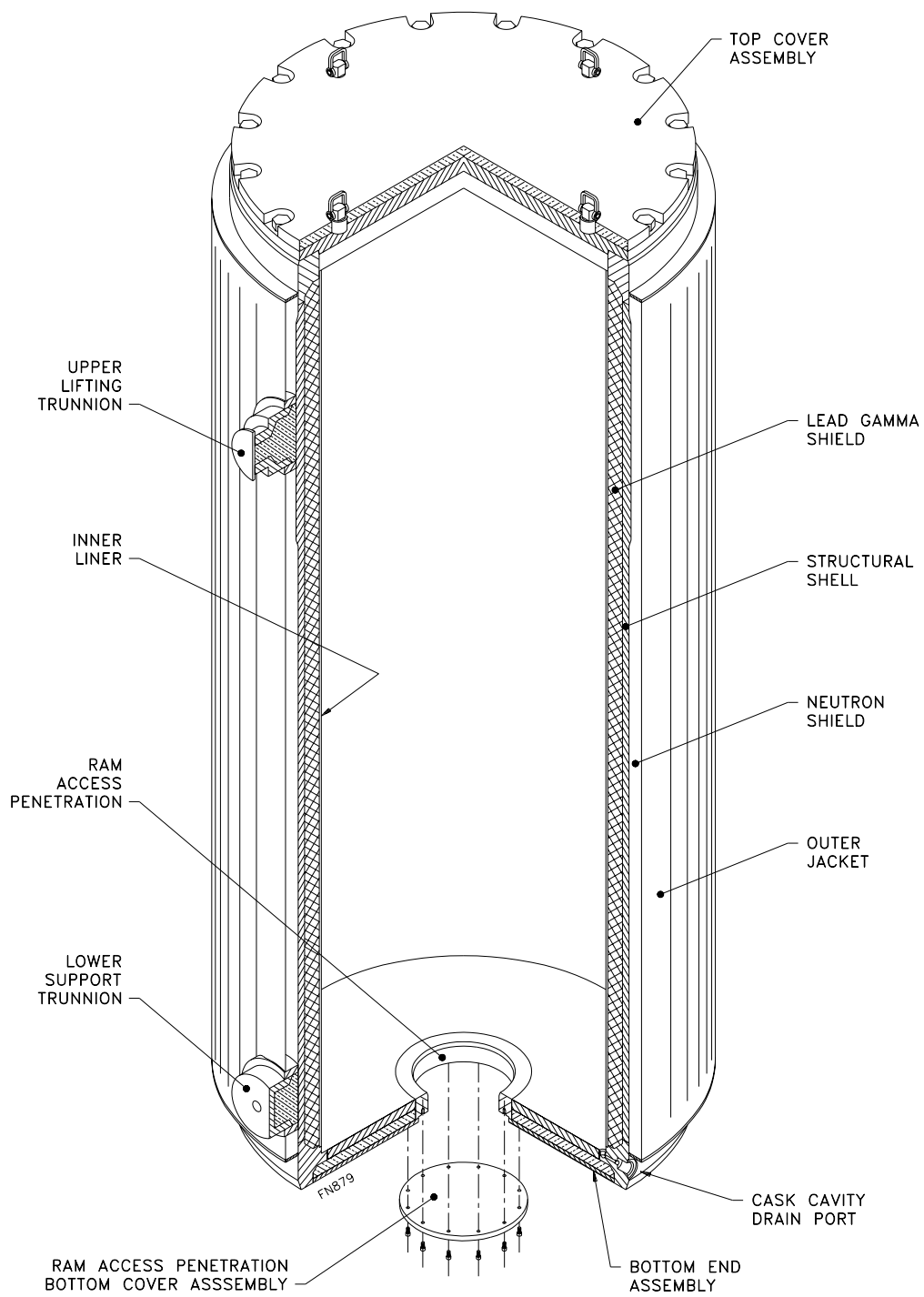


圖 5.3 NUHOMS[®] 貯存設施-運送罐

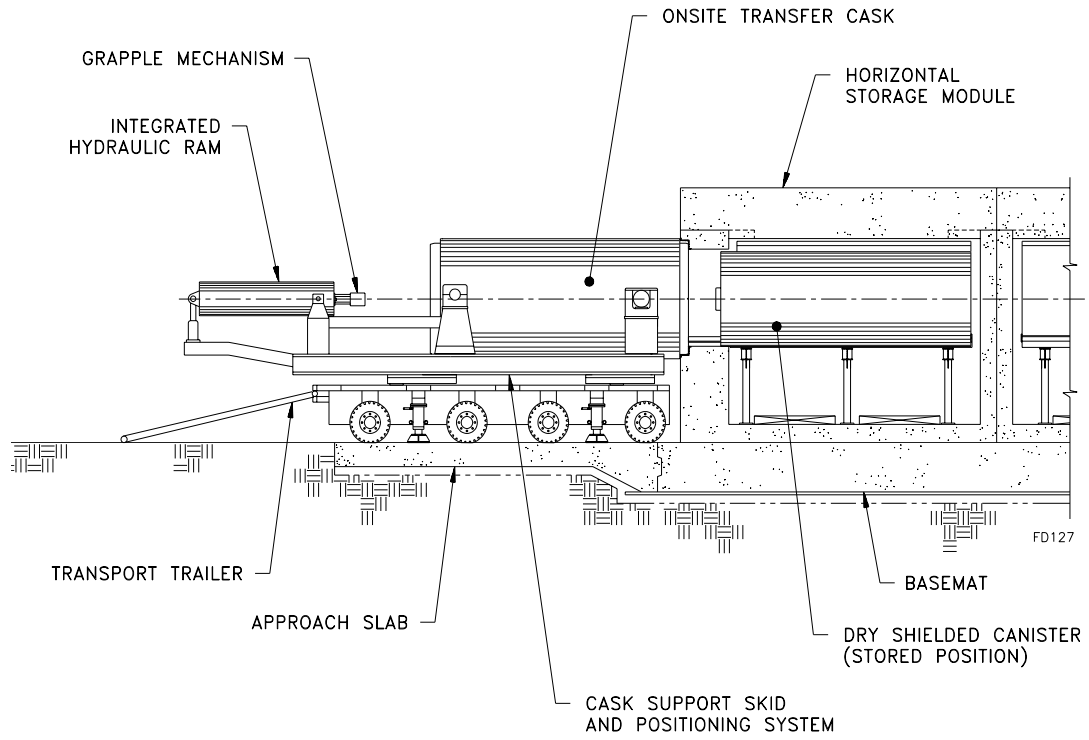


圖 5.4 NUHOMS[®] 貯存設施—傳送設施

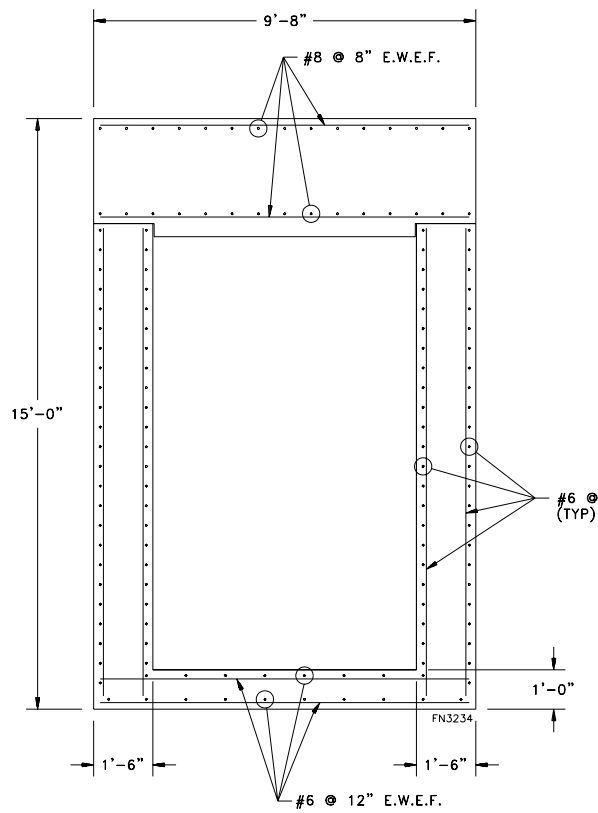


圖 5.5 NUHOMS[®] 貯存設施—水平貯存模組斷面尺寸

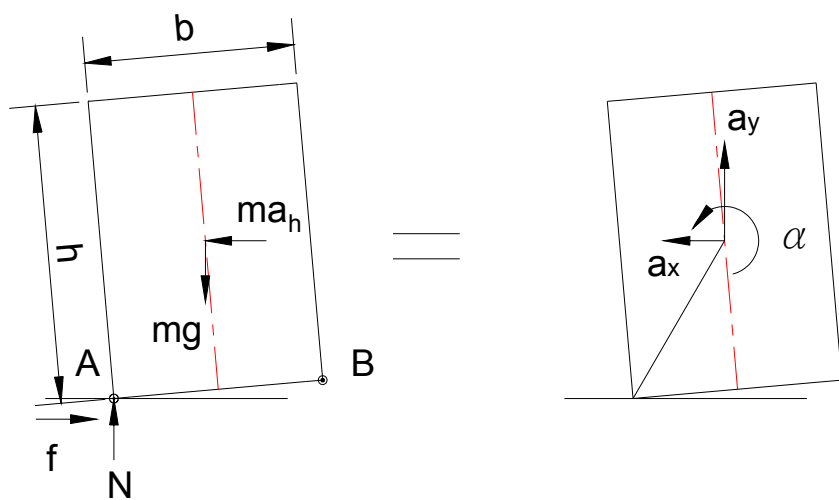


圖 5.6 物體翻覆示意圖(一)

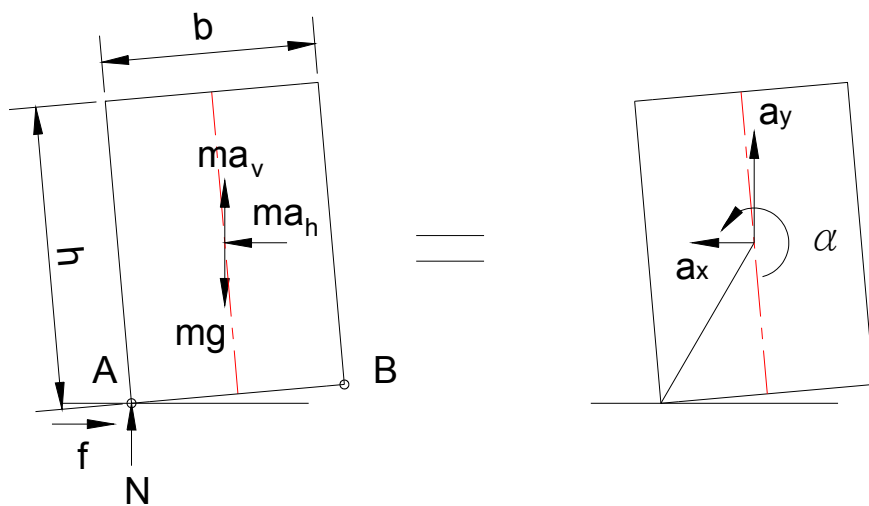
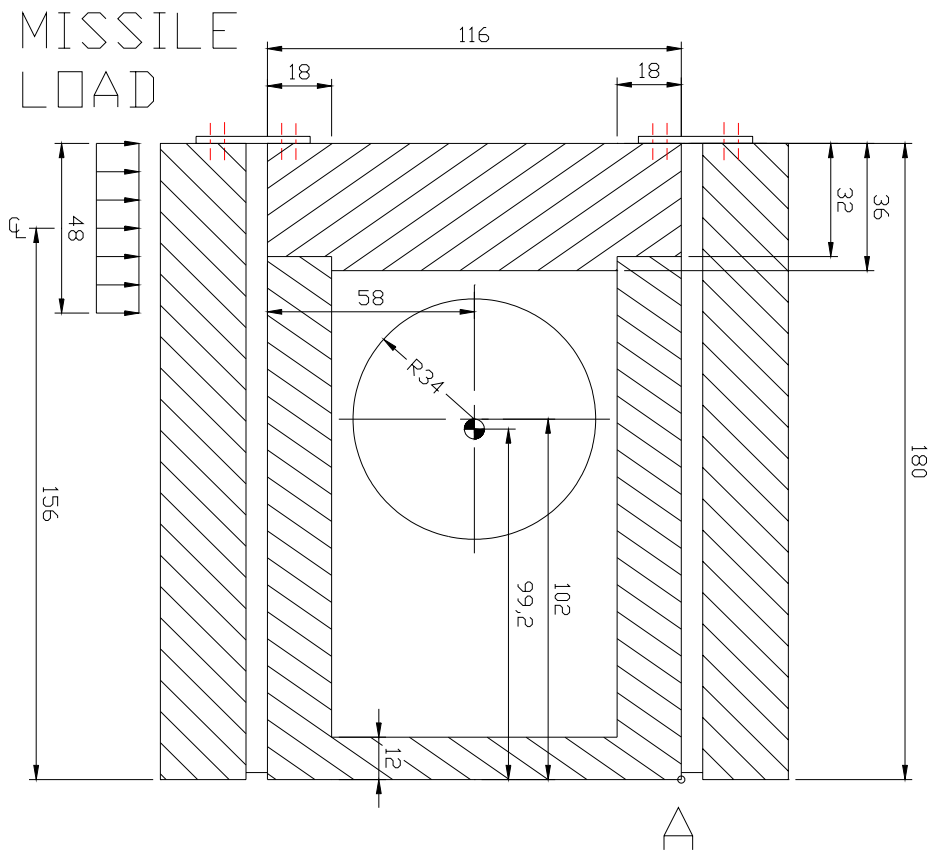
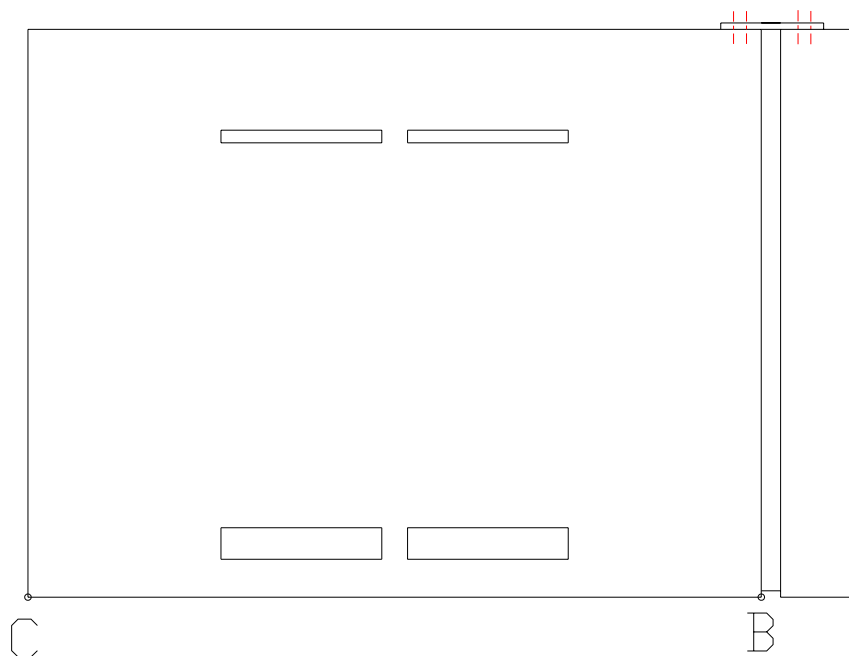


圖 5.7 物體翻覆示意圖(二)



(a) 正面



(b) 側面

圖 5.8 NUHOMS[®] 貯存設施滑動和翻覆分析示意圖

附錄 A 核一廠 C-9 鑽孔資料輸入檔案範例

Option 1 - dynamic soil properties - (max is thirteen):

1							
3							
11	#1 modulus for clay (seed & sun 1989) upper range						
0.0001	0.0003	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3
1.	3.	10.					
1.000	1.000	1.000	0.981	0.941	0.847	0.656	
0.438							
0.238	0.144	0.110					
11	damping for clay (Idriss 1990) -						
0.0001	0.0003	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3
1.	3.16	10.					
0.24	0.42	0.8	1.4	2.8	5.1	9.8	
15.5							
21.	25.	28.					
11	#2 modulus for sand (seed & idriss 1970) - upper Range						
0.0001	0.0003	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3
1.	3.	10.					
1.000	1.000	0.990	0.960	0.850	0.640	0.370	
0.180							
0.080	0.050	0.035					
11	damping for sand (Idriss 1990) - (about LRng from SI 1970)						
0.0001	0.0003	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3
1.	3.	10.					
0.24	0.42	0.8	1.4	2.8	5.1	9.8	
15.5							
21.	25.	28.					
8	#3 ATTENUATION OF ROCK AVERAGE						
.0001	0.0003	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	
1.0							

1.000 1.000 0.9875 0.9525 0.900 0.810 0.725
 0.550

5 DAMPING IN ROCK

.0001 0.001 0.01 0.1 1.
 0.4 0.8 1.5 3.0 4.6
 3 1 2 3

Option 2 -- Soil Profile

2

1 10 Example -- 143-ft layer; input:Diam @ .3g

1	1	3.28	.050	.116	886.
2	1	4.68	.050	.116	886.
3	1	5.00	.050	.116	886.
4	1	5.00	.050	.116	886.
5	1	5.00	.050	.116	886.
6	2	5.00	.050	.125	1647.
7	2	5.00	.050	.125	1647.
8	2	5.00	.050	.125	1647.
9	2	4.68	.050	.125	1647.
10	3		.010	.134	2103.

Option 3 -- input motion:

3

2048 4096 .005 diam3.acc (8f10.6)
 .30 100. 3 8

Option 4 -- sublayer for input motion {within (1) or outcropping (0):

4

10 0

Option 5 -- number of iterations & ratio of avg strain to max strain

5

0 8 0.50

Option 6 -- sublayers for which accn time histories are computed & saved:

6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Option 7 -- sublayer for which shear stress or strain are computed & saved:

```

7
3 1 1 0 2048          -- stress in level 3
3 0 1 0 2048          -- strain in level 3

```

Option 9 -- compute & save response spectrum:

```

9
1 0
1 0 32.2
0.05

```

Option 10 -- compute & save amplification spectrum:

```

10
10 0 1 0 0.50 - surface/rock outcrop

```

execution will stop when program encounters 0

```
0
```

附錄 B 土壤-結構互制分析結果

Soil-Structure-Interaction Evaluation
Of
Independent Spent Fuel Storage Installation (ISFSI)
At
TPC Chin-Shan Nuclear Power Station

Contract No: NS921202

Prepared by :	<u>David Pi</u>	Date: <u>11/30/2003</u>
Review by :	<u>陳建忠</u>	Date: <u>12/15/2003</u>
	<u>康裕全</u>	Date: <u>12/16/2003</u>
	<u>俞文俠</u>	Date: <u>12/16/2003</u>
Approval by :	<u>陳建忠</u>	Date: <u>12/16/2003</u>

SUMMARY

The Chin-Shan Nuclear Power Plant (CSNPP) of Taipower is planning to design and construct an Independent Spent fuel Storage Installation (ISFSI) on site. This project consists of free standing concrete storage casks with metal storage canister inside with spent fuel and a concrete mat foundation to support the casks. The ISFSI is located right next to the power plant. It is required to be designed to the same safety standard as the plant. The stability of the free standing cask during strong earthquake is essential to the ISFSI safe operation.

The mat foundation of the installation is below the grade with the foundation top at ground surface level. It is subject to the seismic surface waves caused by the interaction of the longer period component of the earth body waves with the surface, embedded structures and internal boundaries. The interaction between the soil waves with the embedded structure is known as Soil-Structure-Interaction (SSI). It has been a general public concern on the effects of such interaction to the free field design earthquake load and the effects on the stability of the free standing casks. Such effects can be analyzed by using the computer code SASSI (a System for Analysis of Soil Structure Interaction)

The purpose of this report is to demonstrate the program SASSI analysis procedures and evaluate the results of the SSI analysis of the ISFSI. The mass and stiffness of the structure are the factors in the interaction process. The analyses have considered different cask layout from a few cases to full installation. The results show that the mat foundation has the required stiffness in the horizontal plane to modify the less firm soil free field motion. In order to reduce the SSI effects, the existing soil and backfill underlying the foundation shall be firmly compacted.

The design data and parameters used in this study may not reflect the actual final design of the ISFSI project.

TABLE OF CONTENTS

Summary

List of Tables

List of Figures

1.0	INTRODUCTION.....	161
2.0	DESCRIPTION OF SITE, DESIGN LOAD AND STRUCTURES	162
2.1	PROPOSED ISFSI SITE.....	162
2.2	CSNPP DESIGN SEISMIC LOAD.....	162
2.3	ISFSI STRUCTURE	162
3.0	METHODS OF SSI ANALYSIS	168
3.1	SHAKE91 ANALYSIS.....	168
3.2	SASSI ANALYSIS	168
3.3	SITE RESPONSE ANALYSIS.....	170
3.4	IMPEDANCE ANALYSIS	170
3.5	STRUCTURAL ANALYSIS	171
4.0	RESULTS.....	175
4.1	DESIGN TIME HISTORY	175
5.0	REFERENCES.....	186

List of Tables

Table 2-1 CSNPP SEISMIC DESIGN RESPONSE SPECTRA

List of Figures

- Figure 2-1 Proposed ISFSI Site at CSNPP
- Figure 2-2 Input Soil Profile
- Figure 2-3 CSNPP Input and Output Design Response Spectrum @ 5% Damping
- Figure 2-4 CSNPP Design Time History
- Figure 3-1 SHAKE91 Output Design Time History
- Figure 3-2 SASSI Foundation Model
- Figure 3-3 SASSI Runs for Seismic Interaction Analysis
- Figure 4-1 SASSI Output Time History at Node 1 – 2 Casks
- Figure 4-2 SASSI Output Time History at Node 8 – 2 Casks
- Figure 4-3 SASSI Output Time History at Node 11 – 2 Casks
- Figure 4-4 SASSI Output Time History at Node 37 – 2 Casks
- Figure 4-5 SASSI Output Time History at Node 45 – 2 Casks
- Figure 4-6 SASSI Output Time History at Node 1 – 62 Casks
- Figure 4-7 SASSI Output Time History at Node 8 – 62 Casks
- Figure 4-8 SASSI Output Time History at Node 11 – 62 Casks
- Figure 4-9 SASSI Output Time History at Node 37 – 62 Casks
- Figure 4-10 SASSI Output Time History at Node 45 – 62 Casks

1.0 INTRODUCTION

The Chin-Shan Nuclear Power Plant (CSNPP) of the Taiwan Power Company is planning to design and construct a Independent Spent Fuel Storage Installation (ISFSI) at the Chin-Shan site.

The type of design of the installation has not been finalized. The possible licensed designs of the installation include concrete cask, concrete module and concrete vault. The type of design considered in this report is concrete cask. The reason for selecting the concrete cask in this report because the stability of the free standing cask is more susceptible to the earthquake load than other types.

The concrete cask installation consists of four main components; spent fuel, metal canister with baskets, concrete cask and concrete mat foundation. The spent fuel rods are storage inside the metal canister baskets. The concrete casks are installed on the mat foundation with canister inside. The concrete cask provides radiation shielding protection and cooling ventilation chimney shaft effect for the canister.

The stability of the free standing cask during earthquake are essential to the safe operation of the installation. The possible accident scenario of cask capsize from overturning or Impact between the cask from sliding caused by earthquake shall be considered and investigated.

Taiwan is located in an active seismic zone. The earthquake load is the major dynamic load for design consideration. The objectives of the analysis are to demonstrate the application procedures of the computer code SASSI and evaluate the analysis results.

Section 2 of this report provides the description of the soil condition and design load of the project site and description of the ISFSI structures. Section 3 provides a detailed description of the methodology used in the analyses. Section 4 of this report provides the evaluation results. Section 5 is a list of the references used in the report.

DESCRIPTION OF SITE, DESIGN LOAD AND STRUCTURES

2.1 Proposed ISFSI Site

The proposed ISFSI site is located inside Chin-Shan Nuclear Power Plant restricted area right at other the Chan-Hwa Creek from the plant. (see Figure 2-1). A detailed soil test report was issued in September of 1992 (Ref. 1) for the proposed ISFSI site. The soil report provides the soil layer properties needed for the SSI analysis.

The soil properties used in the analysis is based on the test hole no. C9. The soil property profile is provided in page K-6 of the soil report. On page M-5 of the soil report recommends 3 meters back fill of the existing site for the ISFSI foundation. The SSI analysis assumed the back fill has the same soil properties as the existing first layer. Figure 2-2 shows the profile of soil sublayers and properties used in the analysis. The thickness of the each sublayer is based on the recommendation to limit the layer thickness not exceed 1/5 of the wave length at the highest frequency of analysis.

2.2 CSNPP Design Seismic Load

The design load is based on the design spectra of the CSNPP provided by Taipower as shown in Table 2-1. Only one set of load for 5% damping was used for the analysis. The absolute acceleration values are calculated by assuming a harmonic relationship between displacement, velocity and acceleration. Inverse shock spectrum conversion was perform to generate a arbitrary set of time history. A time step of 0.005 second and about 10 second duration was selected for generating the time history. Figure 2-3 shows the input and output design spectra at 5% damping. The output spectra is the inverse of the generated time history to compare with the input spectra for verification. Figure 2-4 shows the generated design time history

2.3 ISFSI Structure

There are three types of ISFSI systems are proposed to the CSNPP. Only the concrete cask type is selected for the analysis because the free standing cask system is more vulnerable when subject to earthquake load than other system.

The concrete casks are installed on a concrete mat foundation. The thickness of the mat slab is assumed to be 3.28 feet. The size of the mat is 149 ft x 212 ft. The top of the mat is at the elevation +26m of the back fill. The weight of each loaded cask is assumed to be 360 kips.

Figure 2-1

PROPOSED ISFSI SITE AT CSNPP

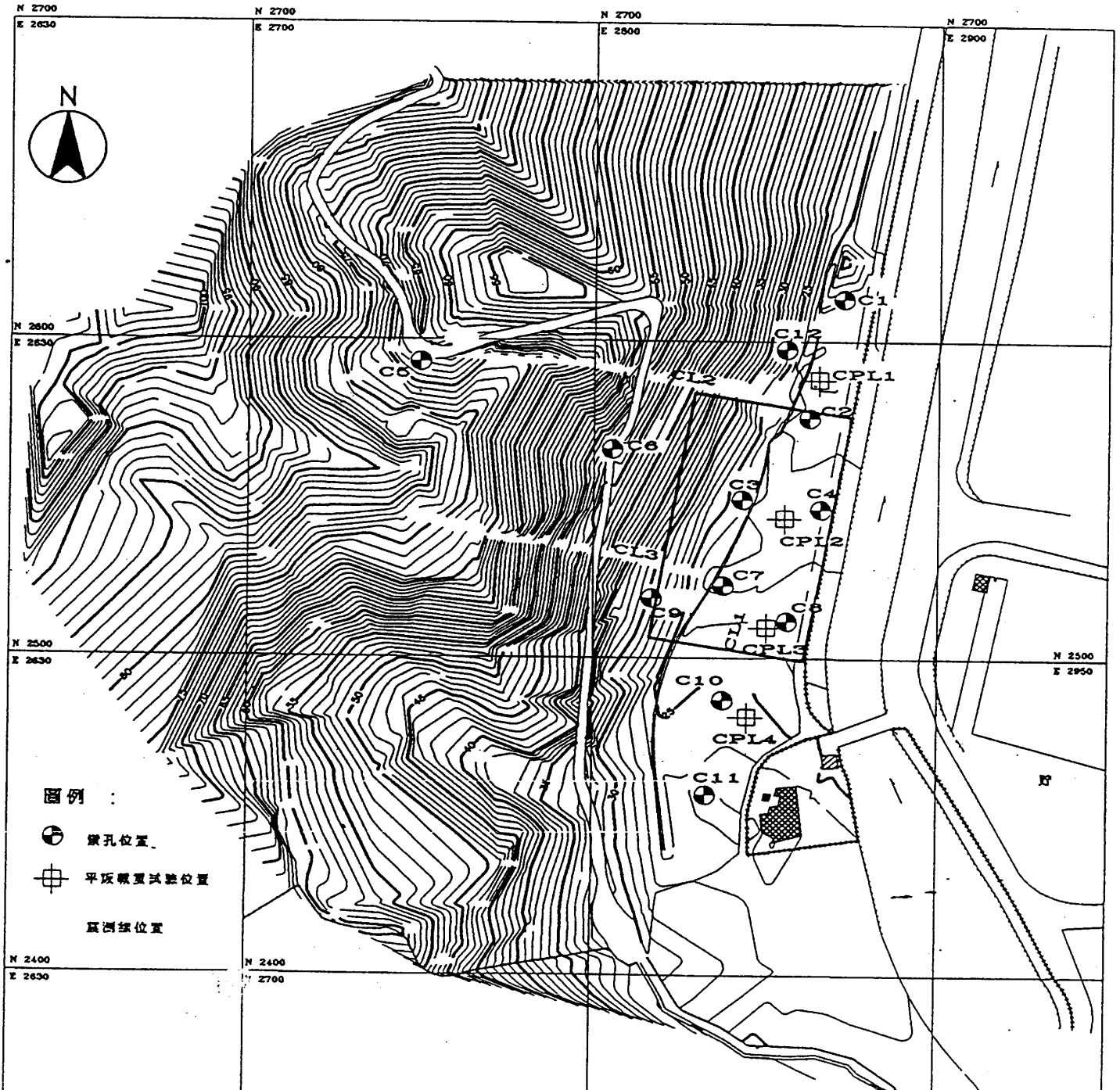


Figure 2-2

INPUT SOIL PROFILE

Depth (ft) Vs (fps) w (kcf) G_{max} (ksf)

Depth (ft)	Vs (fps)	w (kcf)	G_{max} (ksf)
1	886	0.116	2828
2	886	0.116	2828
3	886	0.116	2828
4	886	0.116	2828
5	886	0.116	2828
6	1647	0.125	10530
7	1647	0.125	10530
8	1647	0.125	10530
9	1647	0.125	10530
103	2103	0.134	18405

The diagram shows a vertical soil profile with layers labeled on the left. 'Back Fill' covers layers 1 and 2. 'Layer 1' covers layers 3, 4, and 5. 'Layer 2' covers layers 6, 7, 8, and 9. 'Layer 3' covers the bottom layer starting at 103 ft depth. Arrows indicate the extent of each layer.

Where: $G_{max} = (w/g) Vs^2$

Table 2-1

CSNPP SEISMIC DESIGN RESPONSE SPECTRA

Design Response Spectrum for CSNPP :											
0.5%		1%		2%		5%		7%		10%	
Un-damp Period (sec)	Relative velocity (in/sec)	Un-damp Period (sec)	Relative velocity (in/sec)	Un-damp Period (sec)	Relative velocity (in/sec)	Un-damp Period (sec)	Relative velocity (in/sec)	Un-damp Period (sec)	Relative velocity (in/sec)	Un-damp Period (sec)	Relative velocity (in/sec)
0.009969814	0.181909	0.00997	0.181909	0.00997	0.181909	0.00997	0.181909	0.00997	0.181909	0.00997	0.181909
0.029427266	0.534594	0.029427	0.534594	0.029427	0.534594	0.029427	0.534594	0.029427	0.534594	0.029427	0.534594
0.060269812	1.873137	0.061067	1.690825	0.060564	1.534915	0.06059	1.40975	0.061571	1.265261	0.061617	1.092373
0.099719355	9.822602	0.102453	8.255679	0.101892	6.395907	0.101286	4.481142	0.10378	3.637435	0.100775	2.628044
0.345126883	33.57643	0.369257	29.25714	0.424815	26.23437	0.438954	18.67291	0.467454	15.75971	0.47172	12.11687
4.109388236	33.47847	4.112038	29.46756	4.090297	26.5194	4.161549	18.72801	4.101179	15.6745	4.10647	12.14415

Figure 2-3

CSNPP INPUT AND OUTPUT DESIGN RESPONSE SPECTRUM @ 5% DAMPING

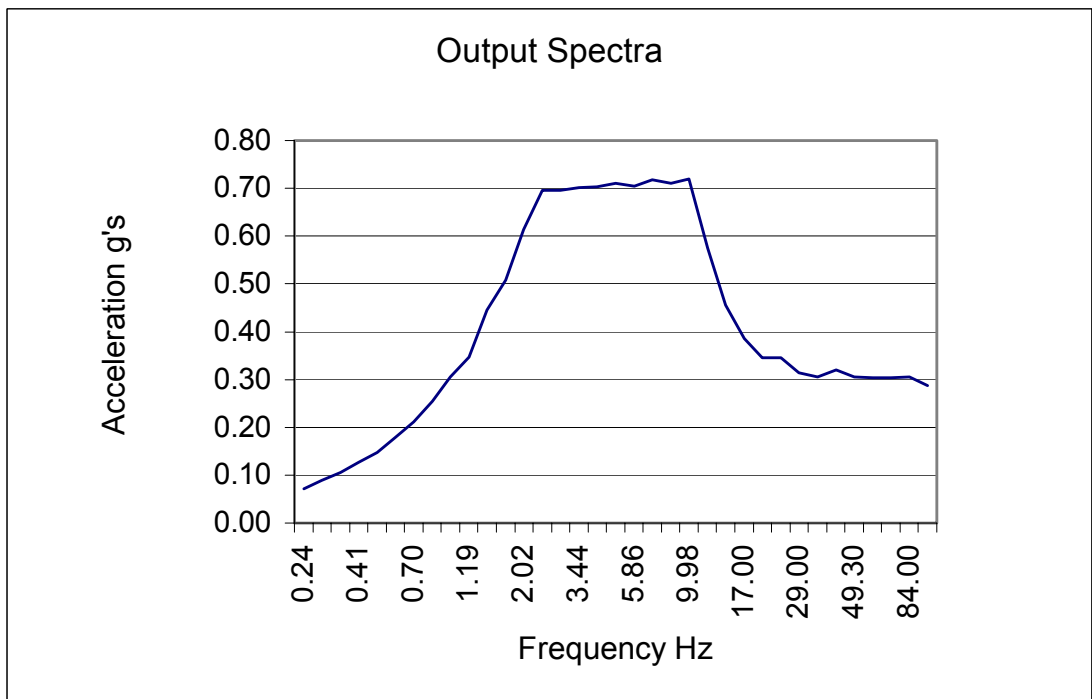
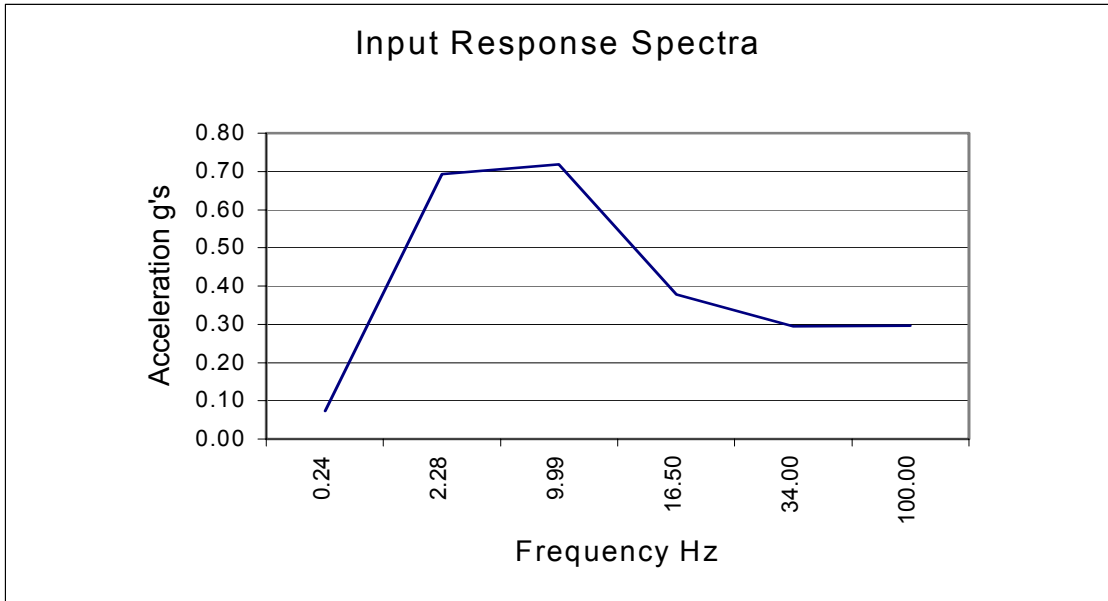
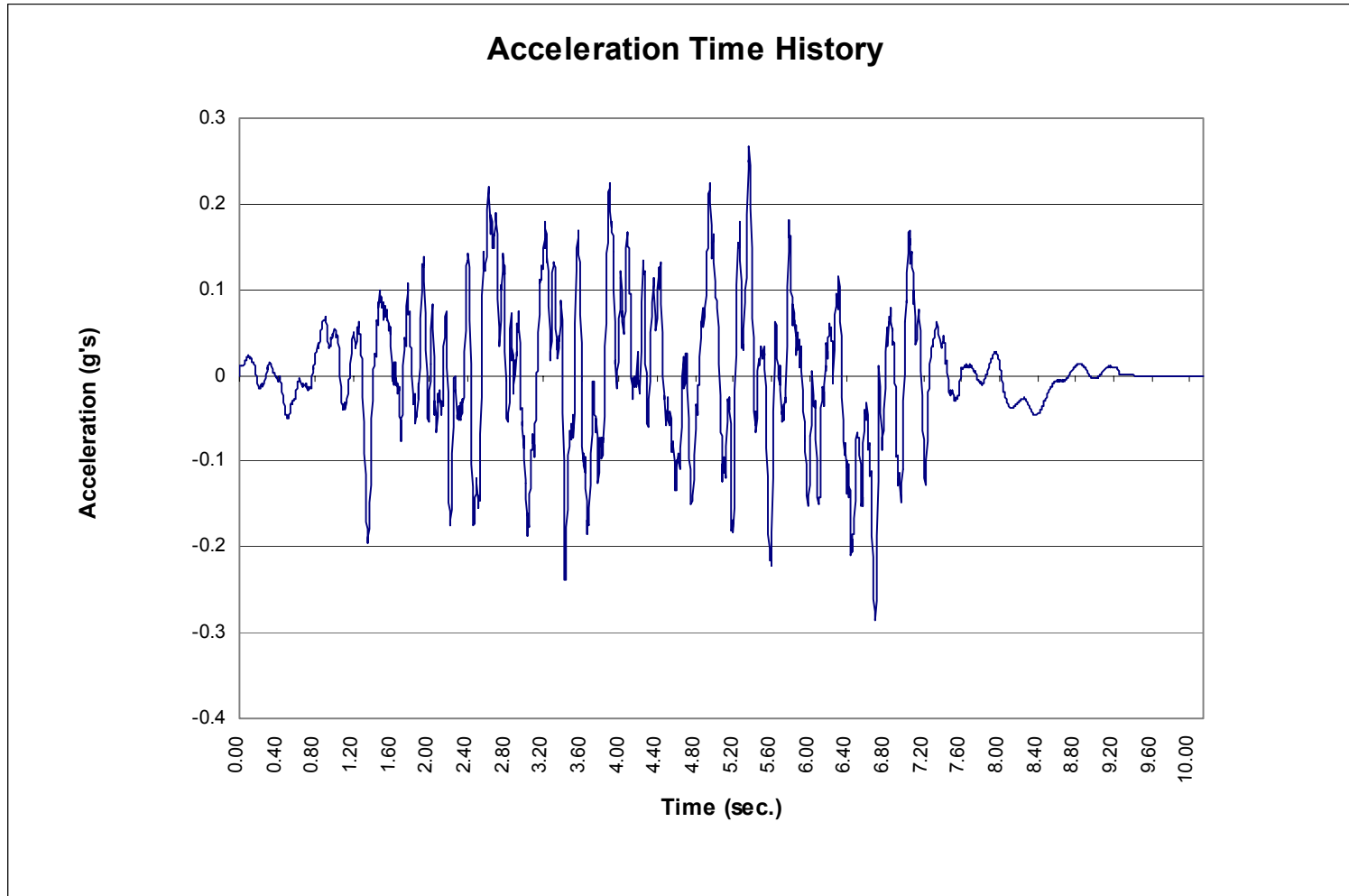


Figure 2-4

CSNPP DESIGN TIME HISTORY



3.0 METHODS OF SSI ANALYSIS

The methods of SSI analysis employed to develop the ISFSI site response spectra due to a postulated design earthquake are described in this section. Since the analytical technique involves the evaluation of the coupled behavior of the ISFSI mat foundation and the underlying soil for dynamic loadings, it will be necessary to first evaluate the dynamic soil properties and soil seismic response before describing the soil-structure interaction (SSI) model used in this evaluation.

3.1 SHAKE91 Analysis

A one dimensional shear wave propagation analysis was performed using the computer code SHAKE91 (Ref. 2). The control earthquake motion of CSNPP was specified for a rock outcrop at the free field ground surface and the response of the entire profile was obtained by the equivalent linear method using the soil data shown in Figure 2-2. The soil profile was divided into sub-layers. The low strain shear modulus, G_{\max} of each sub-layer was calculated from the following equation in SHAKE

$$G_{\max} = (w/g)V_s^2 \dots\dots\dots (3.1)$$

where W , g and V_s are the unit weight, acceleration of gravity and low strain shear wave velocity of the corresponding sub-layer, respectively.

The SHAKE91 analysis was performed for the one horizontal time histories of ground motion, as defined in Section 2.2. The results analysis provided the strain compatible free-field soil properties. The SHAKE91 analysis also provided the motions at the surface of the soil profile to be used in the SSI analysis as shown in Figure 3-1.

3.2 SASSI Analysis

One of the important factors that must be considered when defining the response of a structure to an earthquake is that the motions of the structure itself may influence the ground motions at the base of the structure. In other words, the motion introduced at the base of the structure may be different from the free field motions that would have been observed at the site

This modification of the free field motion in the area of a structure foundation is known as Soil-Structure Interaction. The effect of SSI can be significant if the soil underlying the foundation is firm and the structure is relatively stiff. In this case, the structure will have the required stiffness to modify the free motions of the underlying soil.

The SASSI (System for Analysis of Soil Structure Interaction) computer program was used to perform the SSI evaluation of the ISFSI. The program is described in Ref. 3 Some of the key capabilities and limitations of the SASSI computer program are listed below:

1. The structure and the soil can be modeled in three dimensions (i.e., the model is not limited to being two dimensional or axisymmetric).

2. Embedment of the structure in surrounding soil can be adequately modeled.
3. The SSI analysis is accomplished in the frequency domain.
4. In addition to seismic loads it is also possible to evaluate the effects of impact loads, wave forces or loads from rotating machinery on the structure and foundation.

The theoretical background of SASSI is described in Ref. 4. The basic method of analysis adopted by SASSI is called the flexible volume substructuring method. The method is formulated in the frequency domain using the complex response method and the finite element technique.

In the flexible volume method, the complete soil-structure system is partitioned into two substructures, namely, the foundation and the structure. In this partitioning, the structure consists of the superstructure plus the basement minus the excavated soil; i.e., the soil to be excavated is retained with the foundation. Interaction between the structure and the foundation occurs at all basement nodes.

The equations of motion for the flexible volume method are developed by combining the equations of motion for the structure with those of the soil in the frequency domain using concepts of substructuring, thus leading to

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{si} \\ C_{is} & (C_{ii} - C_{ff} + X_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ X_f * U_f' \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.2)$$

from which the final total motions of the structure can be determined. In these equations, the subscripts s, i, and f refer to degrees of freedom associated with the nodes on the superstructure, basement, and excavated soil, respectively (see Figure in the Ref. 3). C is the complex frequency-dependent stiffness matrix

$$C(\omega) = K - \omega^2 * M \dots\dots\dots(3.3)$$

where M and k are the total mass and complex stiffness matrices, respectively, and ω is the frequency of vibration. u is the vector of complex nodal point displacements. u_f is the free field motions. X_f is a frequency-dependent matrix which represents the dynamic stiffness of the foundation at the interaction nodes. X_f will be referred to as the impedance matrix. The displacement response quantity $u(\omega)$ is in the frequency domain. u is transformed back to the time domain by taking the inverse Fourier transform of $u(\omega)$.

Equation (3.2) considers only seismic forces. External loads at the superstructure and basement nodes can be considered simply by adding the amplitudes of these forces to the load vector (right-hand side of Equation (3.2)) at each frequency. Thus the final motions of the structure can be determined from the following equations:

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{si} \\ C_{is} & (C_{ii} - C_{ff} + X_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} EF_s \\ EF_f \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.4)$$

where EF_s and EF_f are the amplitudes of external forces at the superstructure and basement nodes, respectively.

According to this formulation, the solution of the soil-structure interaction problem reduces to three steps (for each frequency):

1. Solve the site response problem to determine the free field motions u_f within the embedded part of the structure.
2. Solve the impedance problem to determine -lie matrix X_f .
3. Solve the structural problem. This involves forming the complex stiffness matrices and load vector shown in Equations (4.3) and (4.5) and solving this equation for the final displacements.

3.3 Site Response Analysis

The original site is assumed to consist of horizontal soil layers overlying a uniform half space. All material properties are assumed to be elastic.

With the proposed system, only the free field displacements of the soil layer interfaces where the structure is connected are of interest. Accordingly, displacement amplitudes will be expressed in the form

$$U'_f(x) = U_f e^{i(\alpha x - kx)} \dots\dots\dots(3.5)$$

where U_f is a vector (mode shapes) which contains the interface amplitudes at and below the control point ($k=0$) and k is a complex wave number which expresses how fast the wave propagates and decays in the horizontal x -direction. Effective discrete methods have been developed for determining appropriate mode shapes and wave numbers corresponding to control motions at any layer interface for P, S_V , S_H , Rayleigh and Love waves. Any combination of such waves can be applied simultaneously.

3.4 Impedance Analysis

As previously stated, the impedance matrix represents the dynamic stiffness of the foundation at the interaction nodes ("i" nodes in Figure 4.3-1(c)). Thus it can be determined as the inverse of the dynamic flexibility matrix F_f for these nodes:

$$x_f = F_f^{-1} \dots\dots\dots(3.6)$$

The columns of F_f can be calculated by successively applying unit amplitude loads at each of the

interaction nodes. F_f is a full symmetric complex matrix, the SASSI currently uses an efficient in-place inversion subroutine in the program.

3.5 Structural Analysis

With the exception of forming the load vector and modifying the complex stiffness matrix for the structure by subtracting the corresponding matrix for the excavated soil and adding the impedance matrix as shown in Equation (3.2). The structural analysis is standard process and the computational effort is essentially the same as for a complex response analysis of the unmodified structure on a rigid foundation.

The soil-structure interaction structural model is shown in Figures 3-2. The mat foundation is modeled by 8 nodes brick element with three translational freedom per node. There are two symmetry plans used to reduce the number of nodes and elements. Therefore, the model is only $\frac{1}{4}$ of the actual mat foundation. There are two cask layout are considered in the analysis, with 1 or 17 casks layout in the $\frac{1}{4}$ model which represent 2 and 62 casks on the full foundation model. Figure 3-3 illustrates the SASSI runs for seismic interaction analysis.

The excavated soil elements are also modeled by the 8 nodes brick elements with three translational degrees of freedom per node. The weight of the casks are lumped to nodes, these nodes are tied to foundation nodes with factitious beam elements to distribute the cask mass to the foundation.

Based on the mass and stiffness properties of the ISFSI, the input free field motions will be modified in the area of the under the foundation. Earthquake acceleration time history will be generated for selected locations (nodes 8, 11, 37 and 45, see Figure 3-2) of the mat foundation. The results also provide the acceleration response spectra with 5% of critical damping for each time history.

Figure 3-1

SHAKE 91 OUTPUT TIME HISTORY

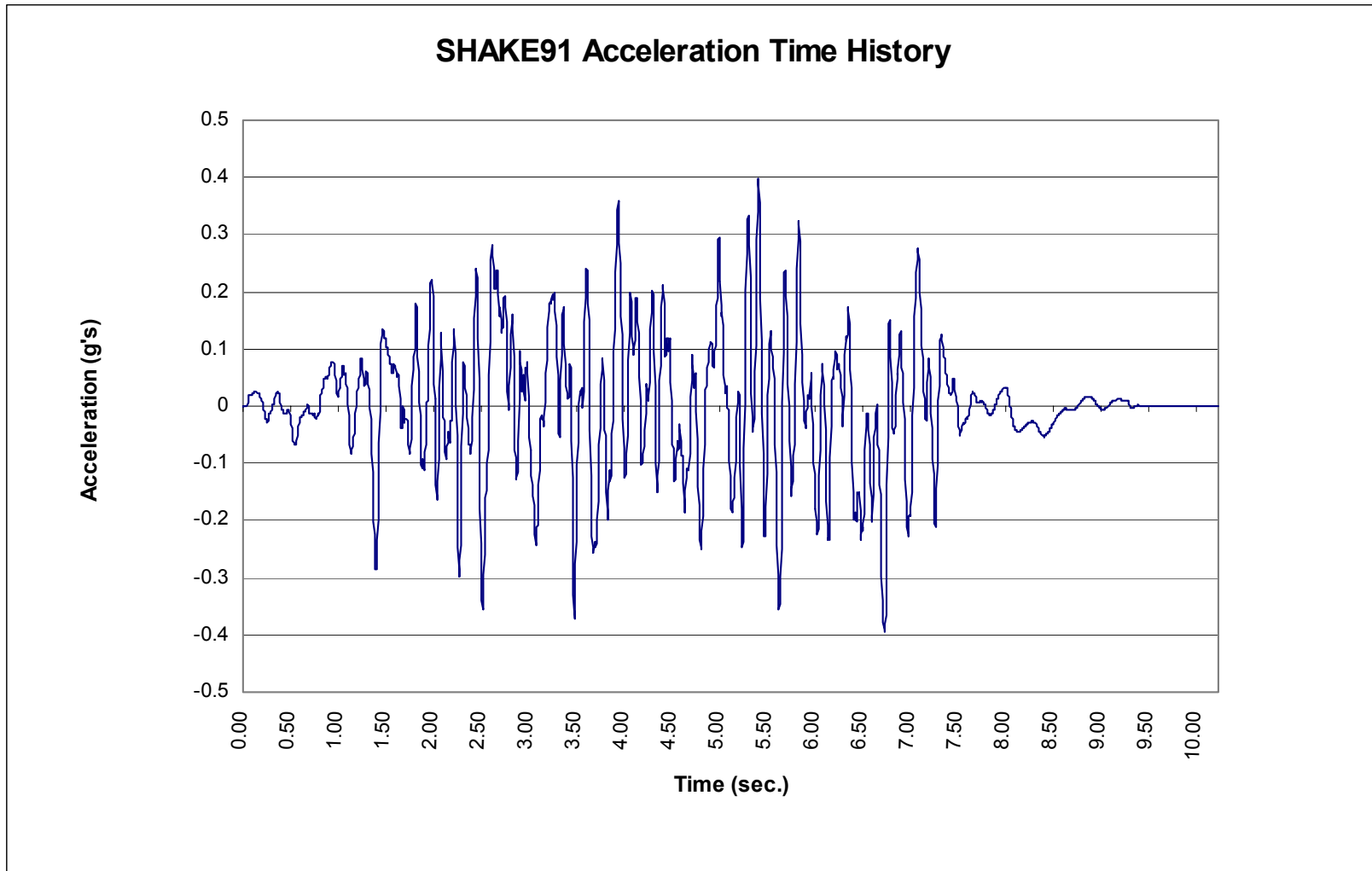
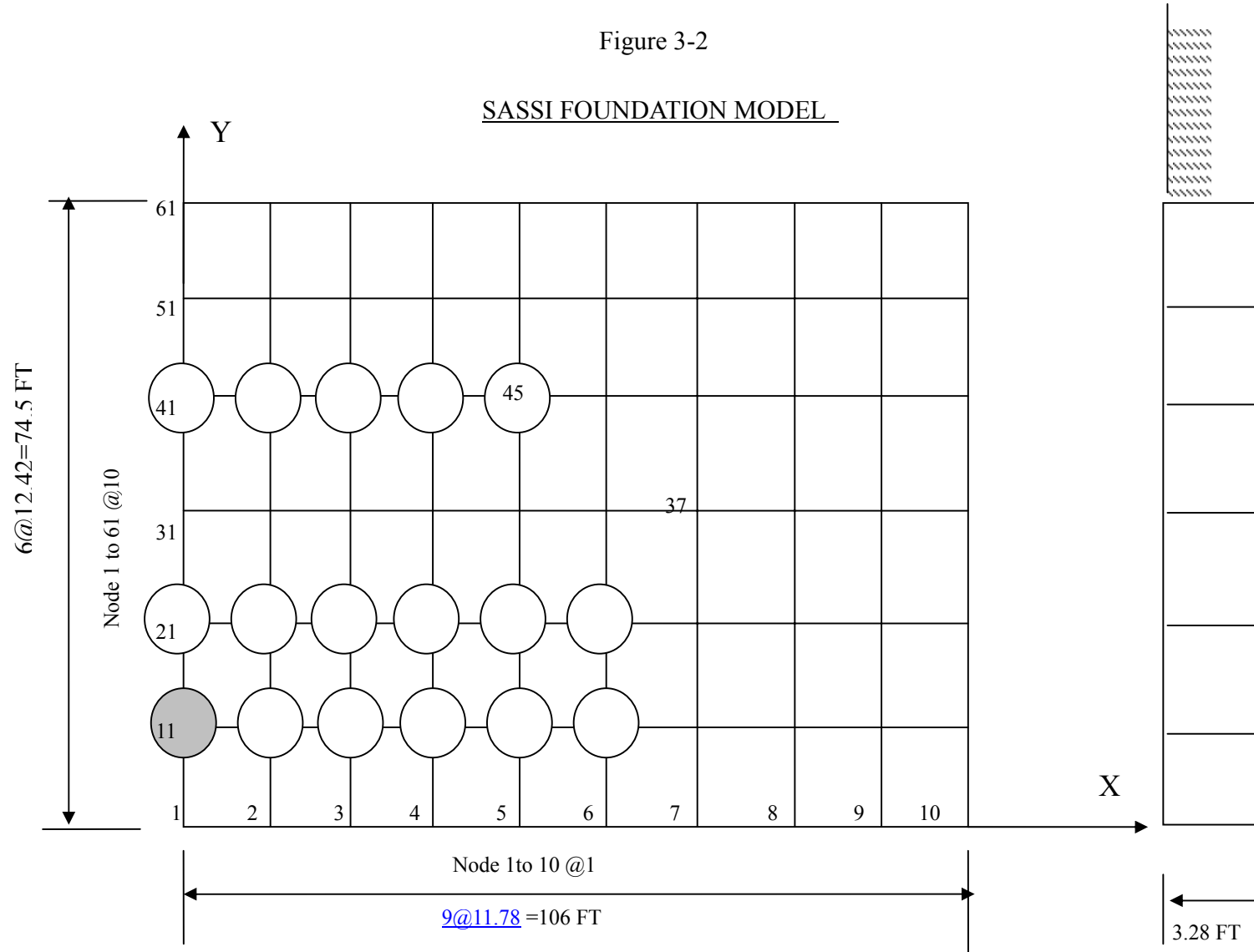


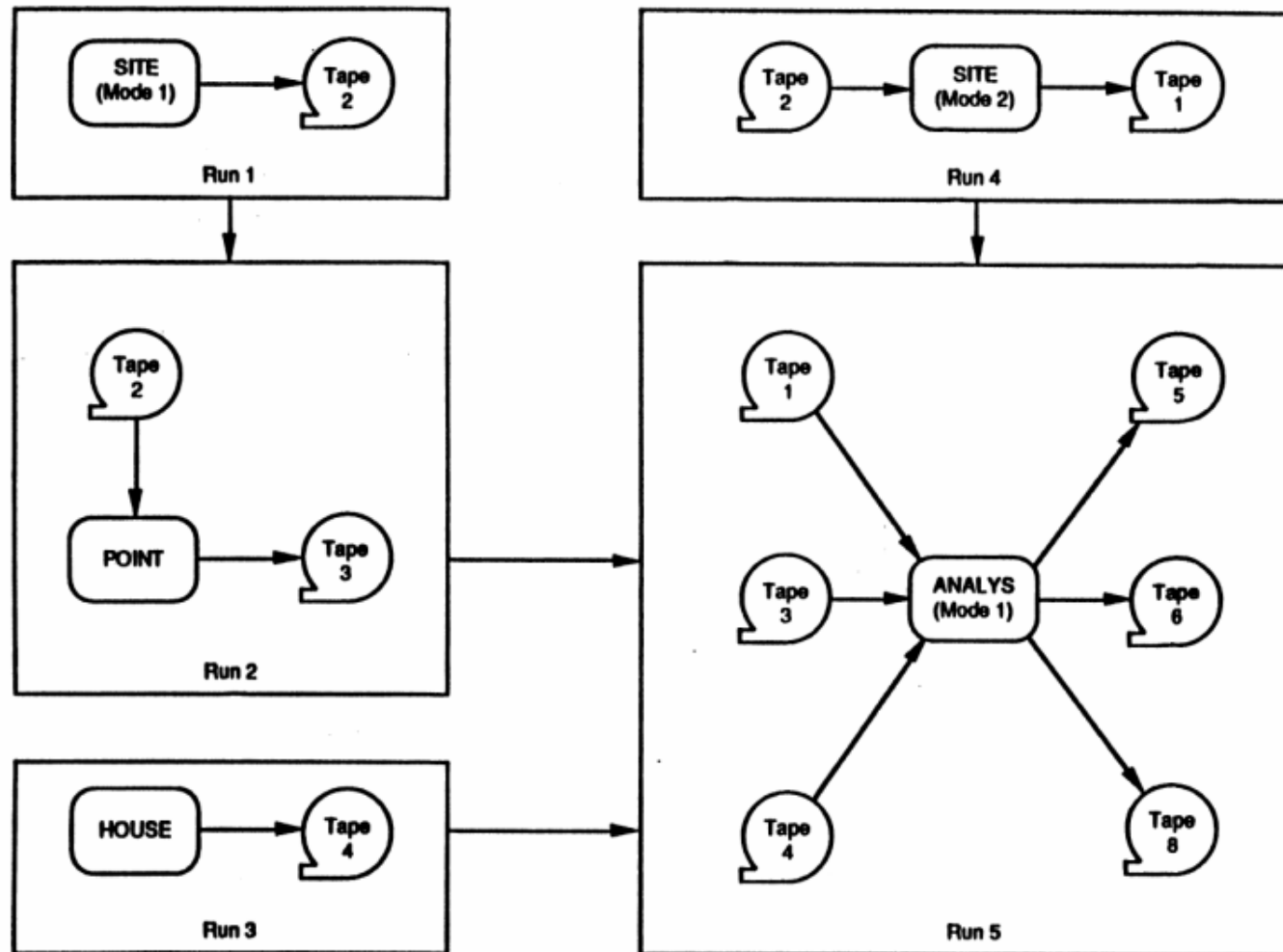
Figure 3-2



Notes: The weight of each cask is 360 Kips

Figure 3-3

SASSI RUNS FOR SEISMIC INTERACTION ANALYSIS



4.0 RESULTS

In this section the results of the SASSI evaluation of the ISFSI will be presented and discussed.

4.1 Design Time History

None-linear dynamic analysis will be performed to evaluate the stability of the free standing cask for sliding and overturning due to seismic load. SASSI generates the seismic load acceleration time histories and response spectra for nodes 1, 8, 11, 37 and 45 and for two cask layout conditions. The plots are shown in Figures 4-1 through 4-10 show.

The results of the response spectra show the SSI has significant effects to the ISFSI site seismic load.

For 2 cakes case, the ZPA value are increased from 0.3g to 0.5~0.8 range. At lower frequency, 5~15Hz range, the accelerations are increased significantly.
For 62 cases case, the ZPA value are increased from 0.3g to 0.7~1.1g range. At lower frequency, the accelerations are also increased.

The results show that the mat foundation is relatively stiff structure in the horizontal plane. The existing top soil and assumed backfill soil underlying the foundation is less firm soil. The foundation has the required stiffness to modify the motions of the underlying soil from the free field motion.

Figure 4-1
SASSI Output Time History at Node 1 – 2 Casks

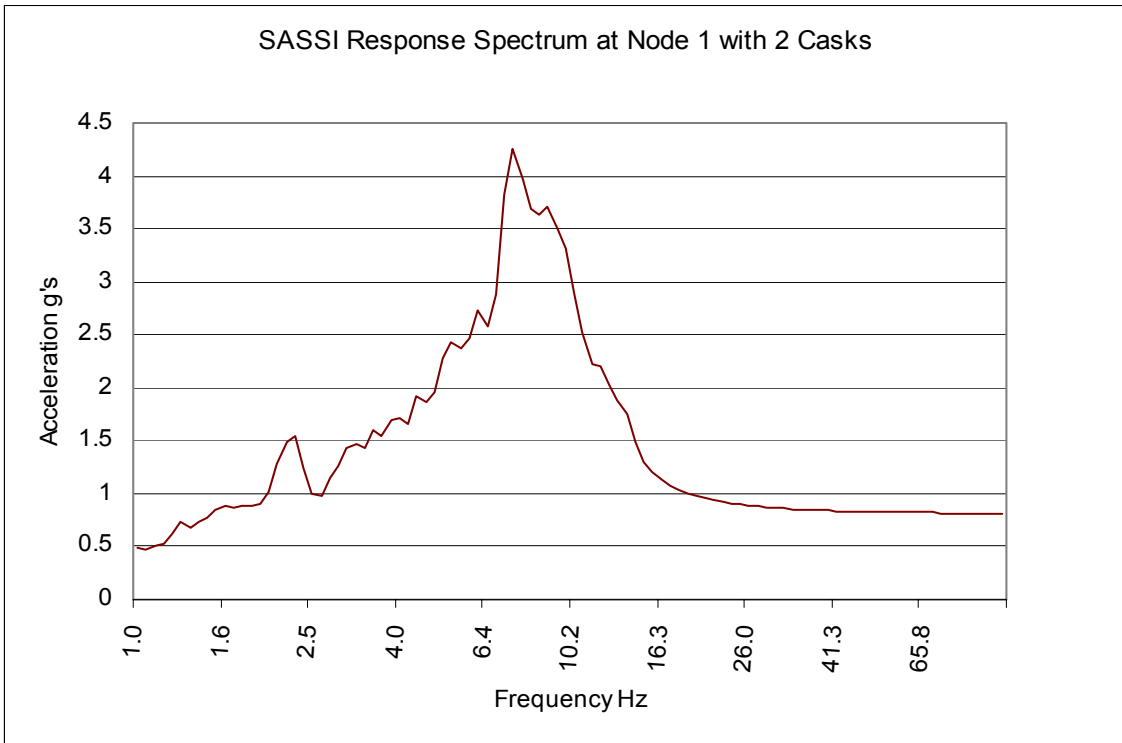
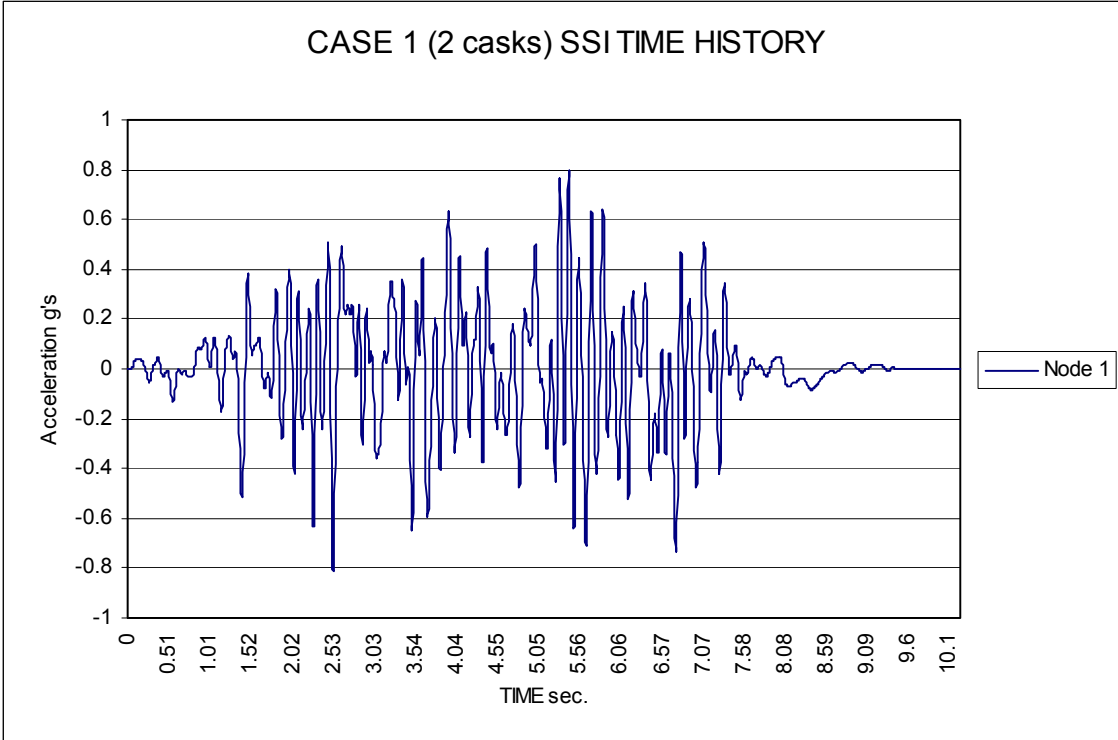


Figure 4-2
SASSI Output Time History at Node 8 – 2 Casks

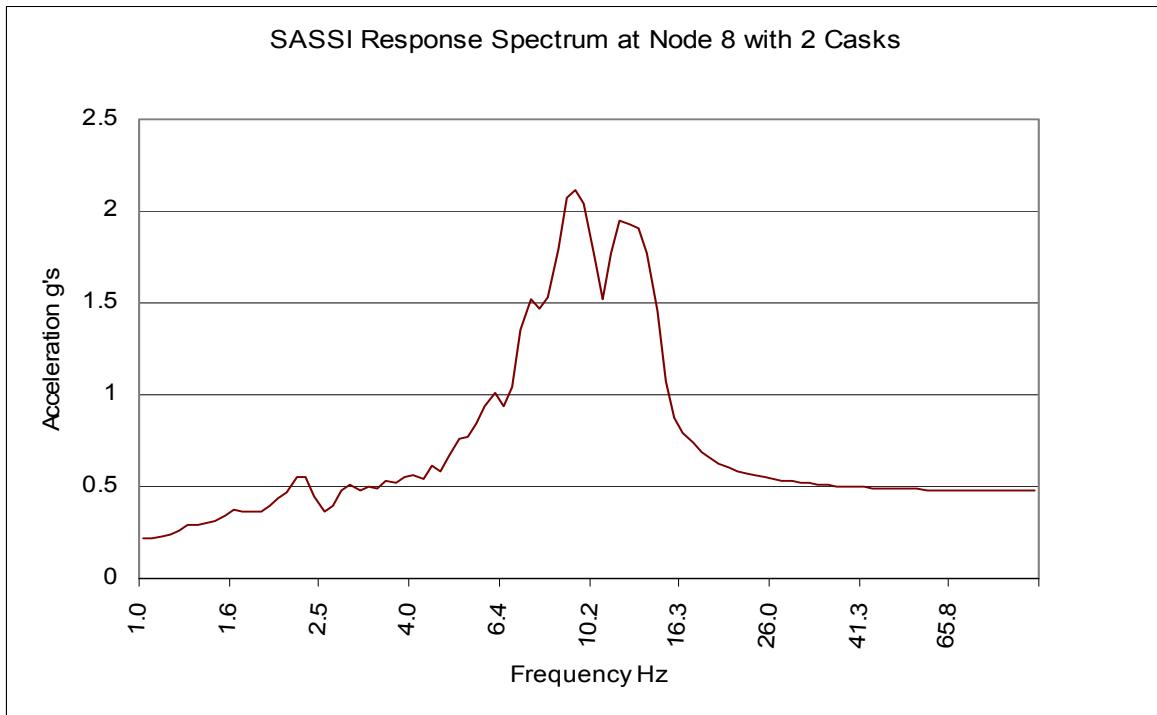
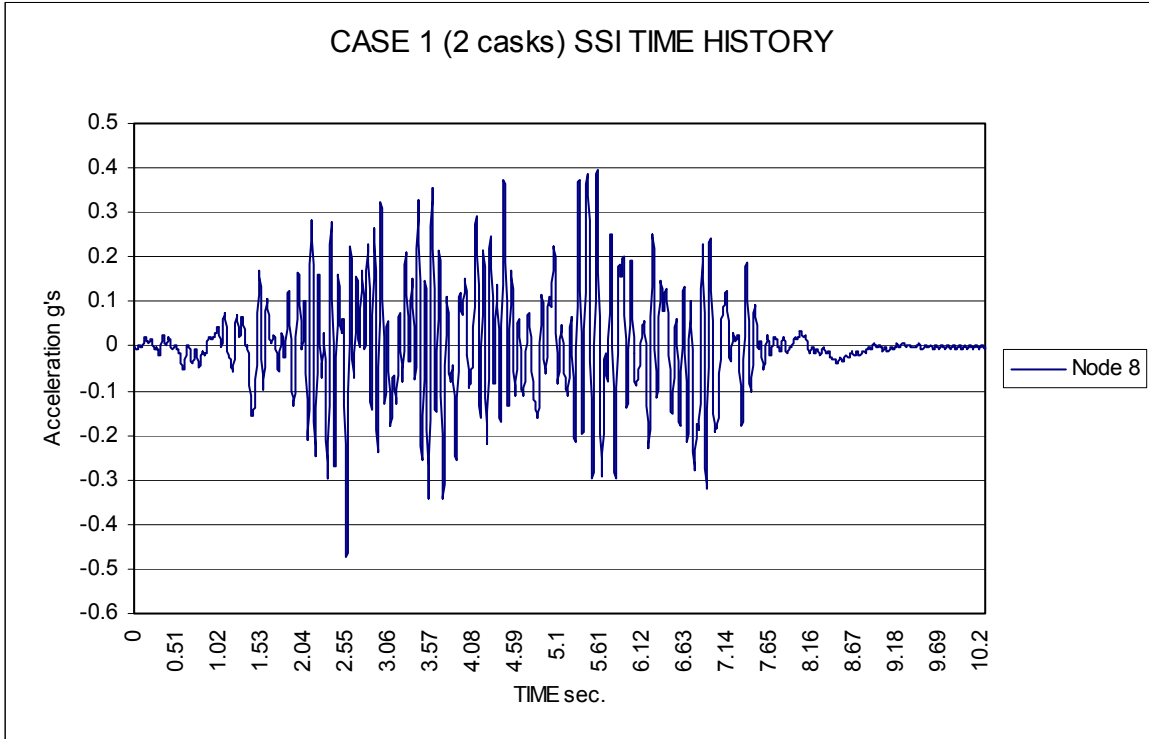


Figure 4-3
SASSI Output Time History at Node 11 – 2 Casks

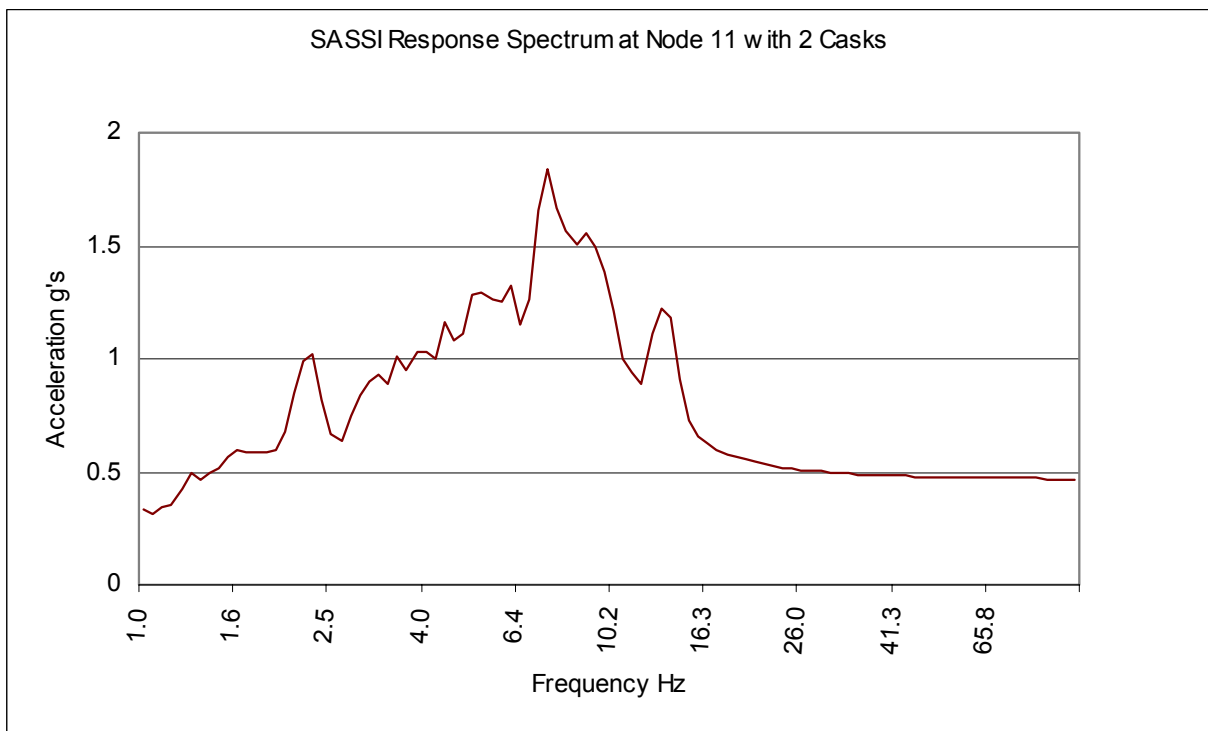
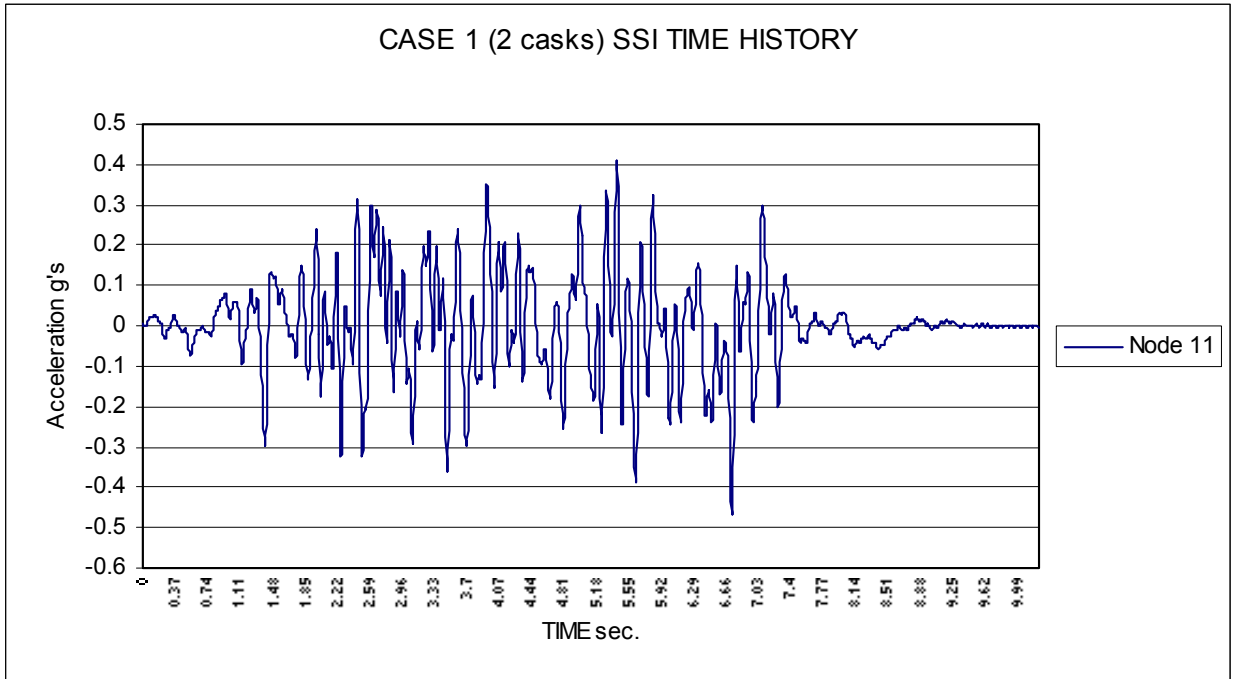


Figure 4-4
SASSI Output Time History at Node 37 – 2 Casks

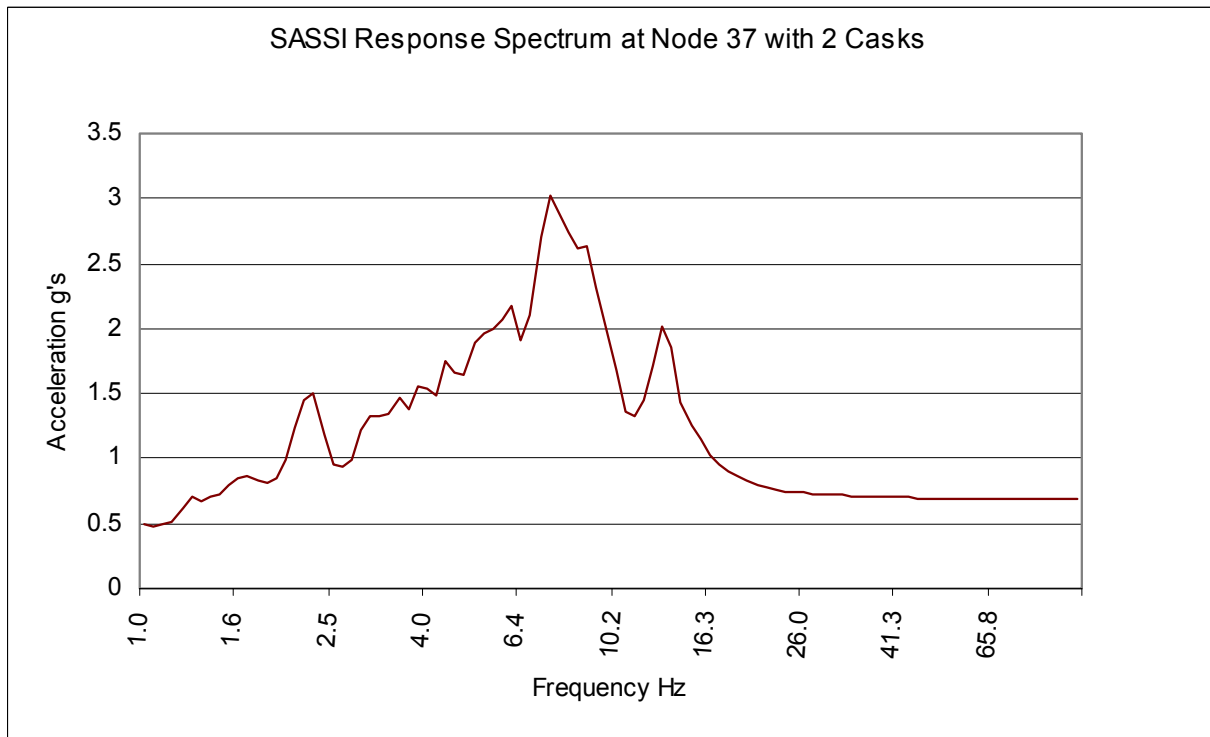
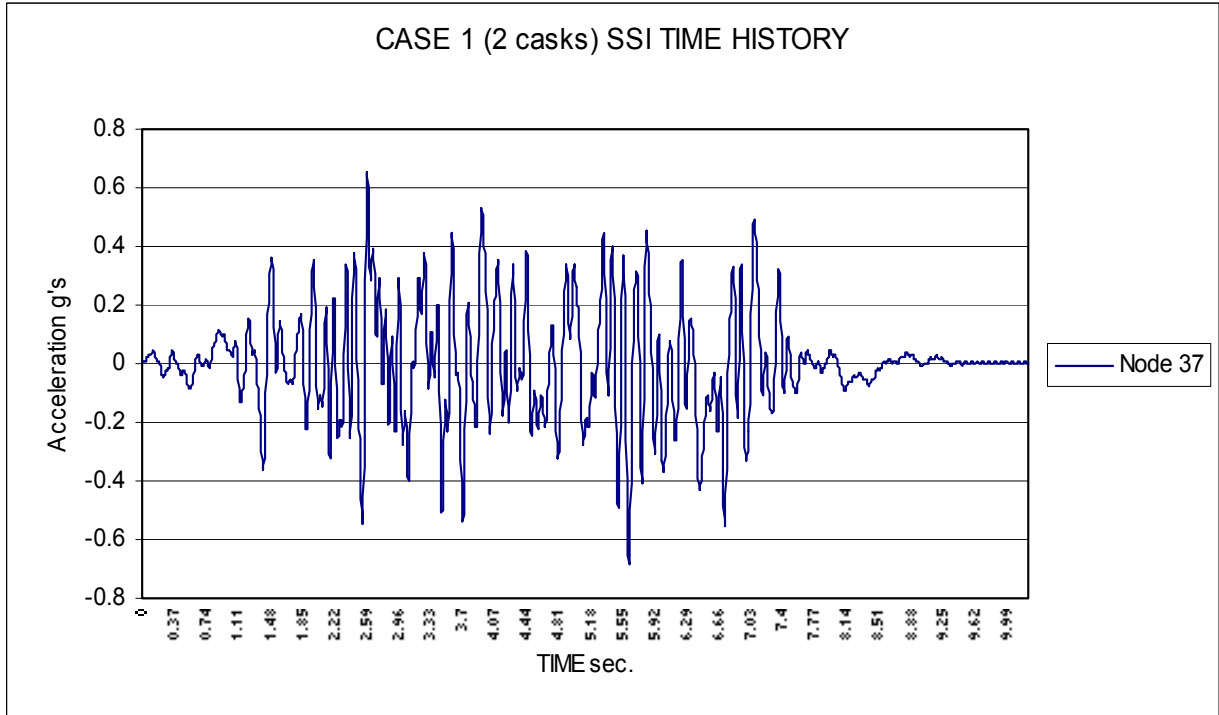


Figure 4-5
SASSI Output Time History at Node 45 – 2 Casks

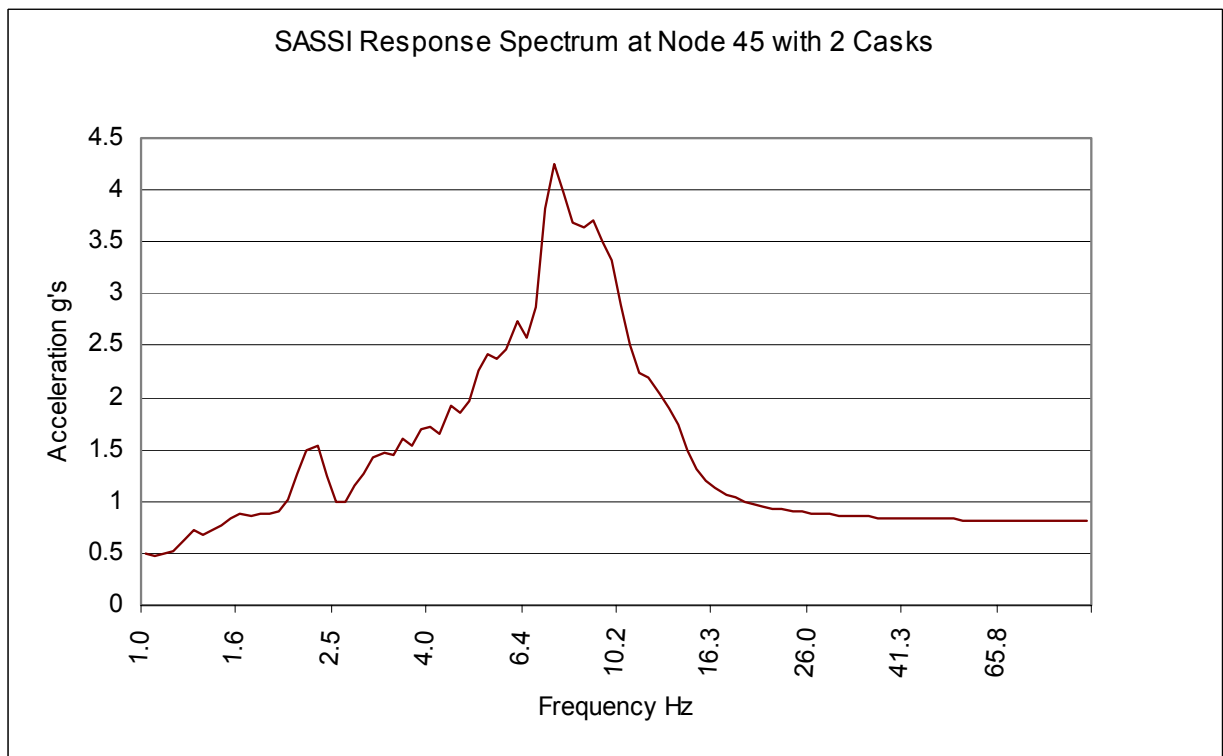
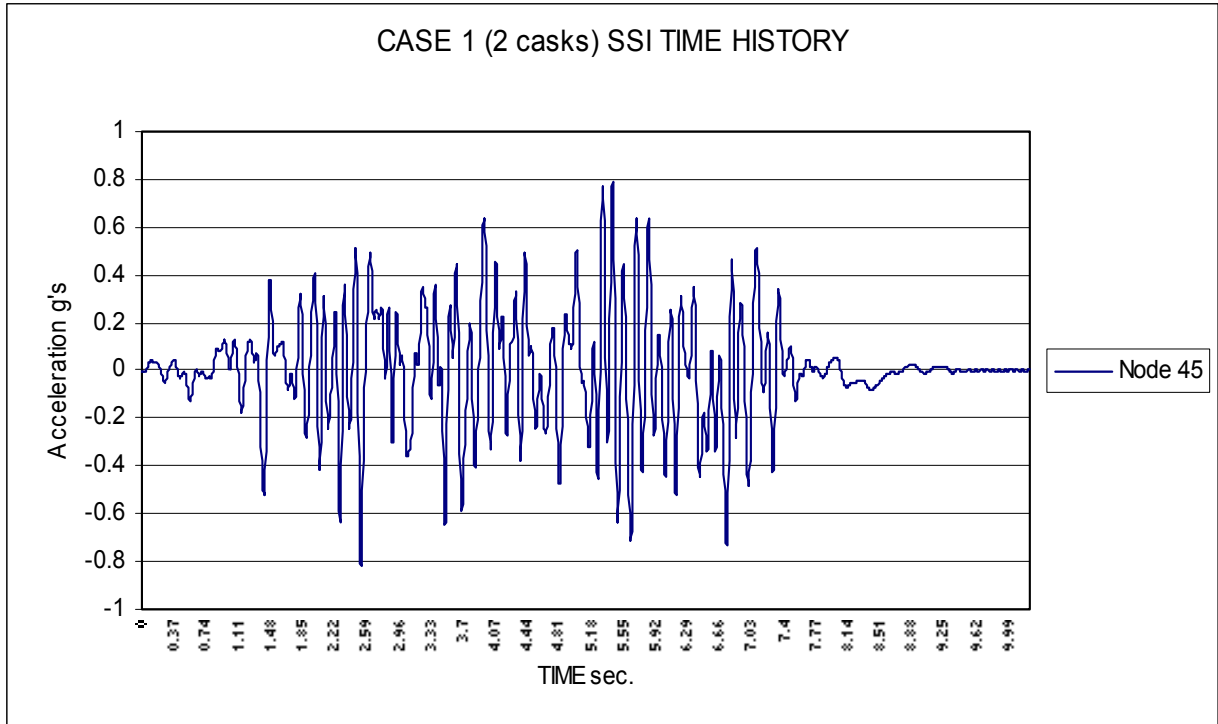


Figure 4-6
SASSI Output Time History at Node 1 – 62 Casks

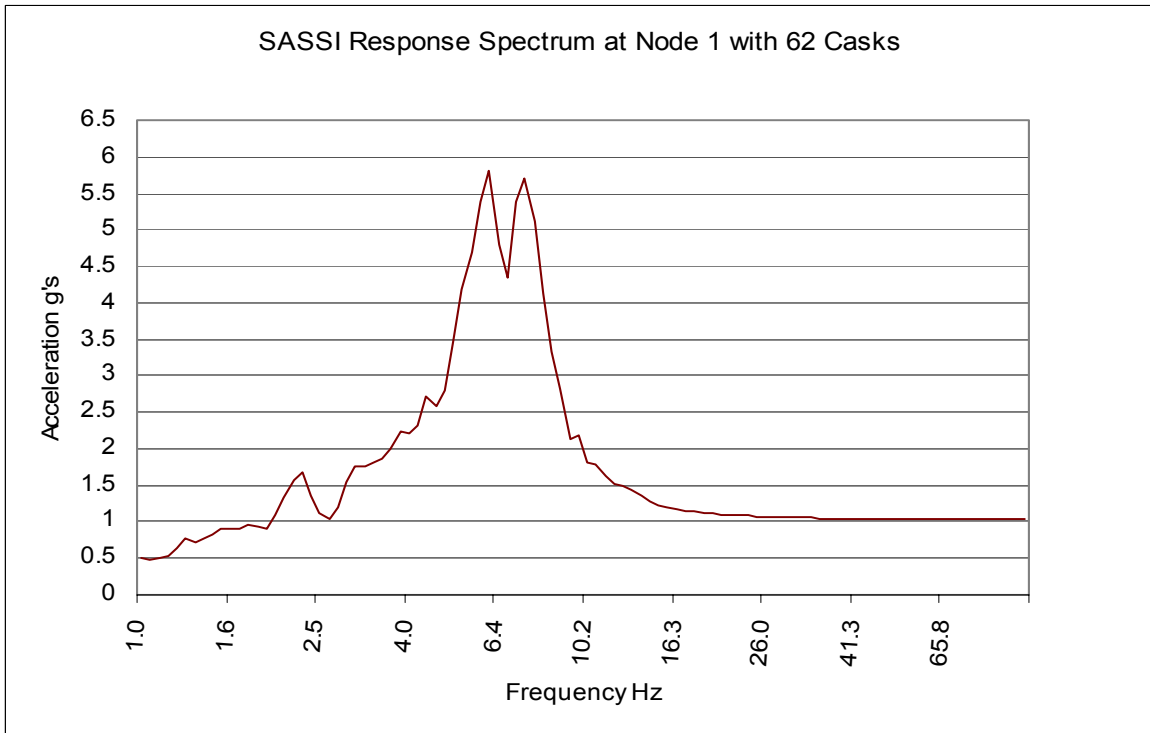
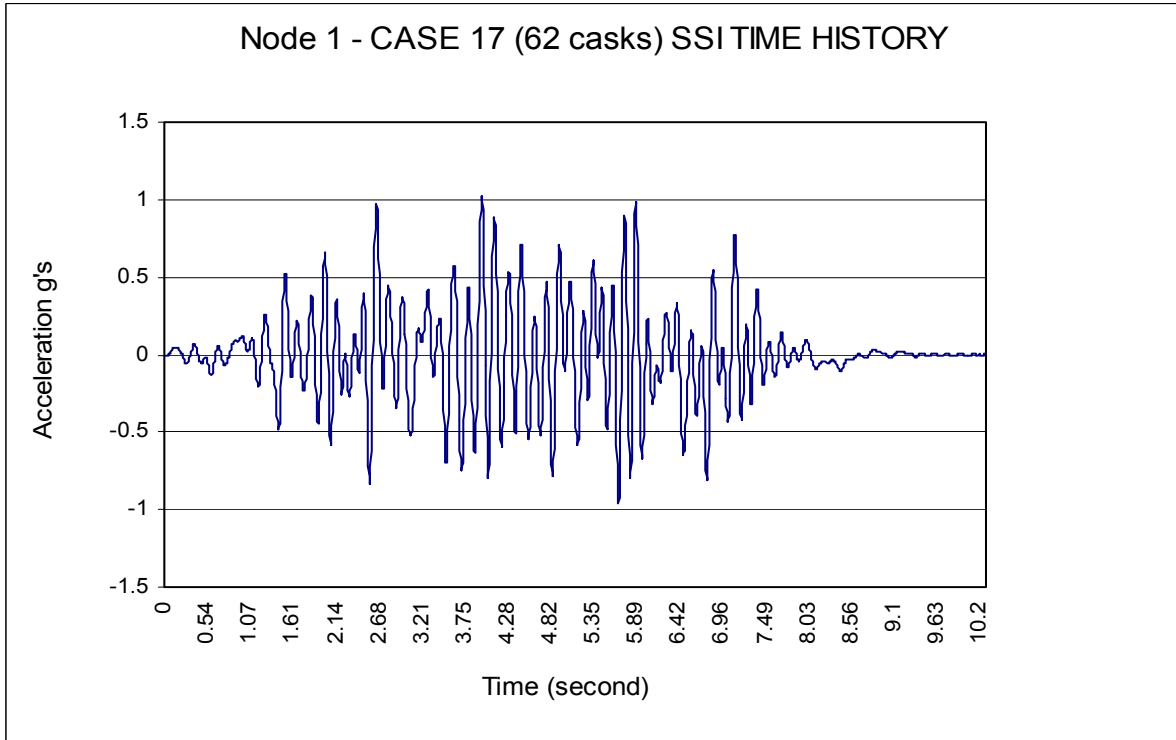


Figure 4-7
SASSI Output Time History at Node 8 – 62 Casks

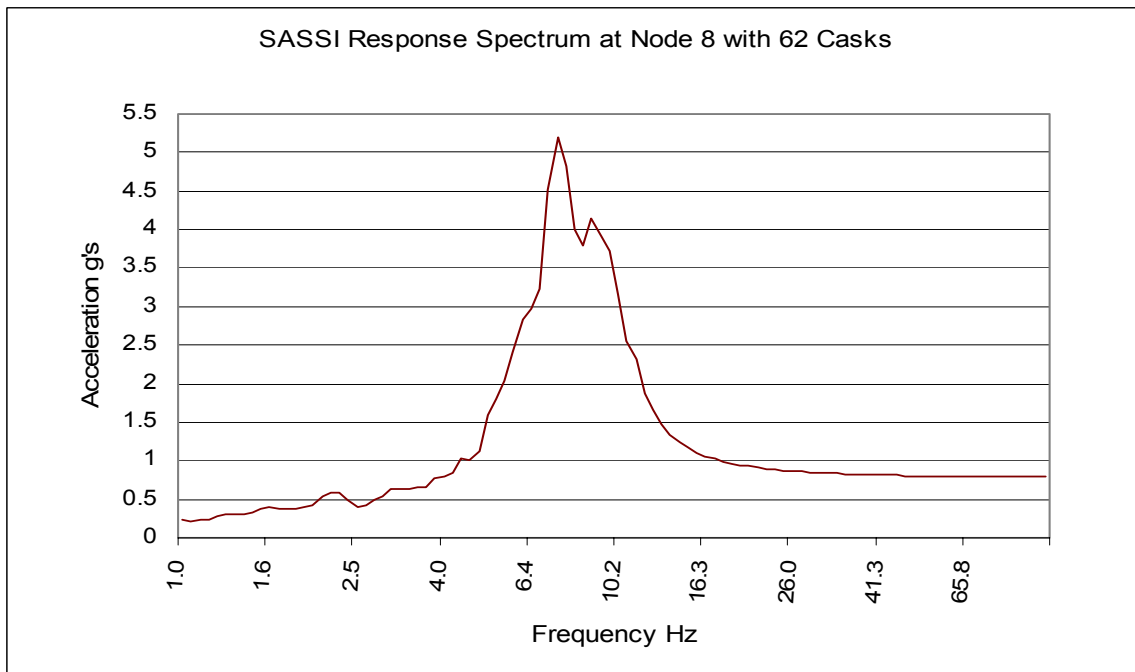
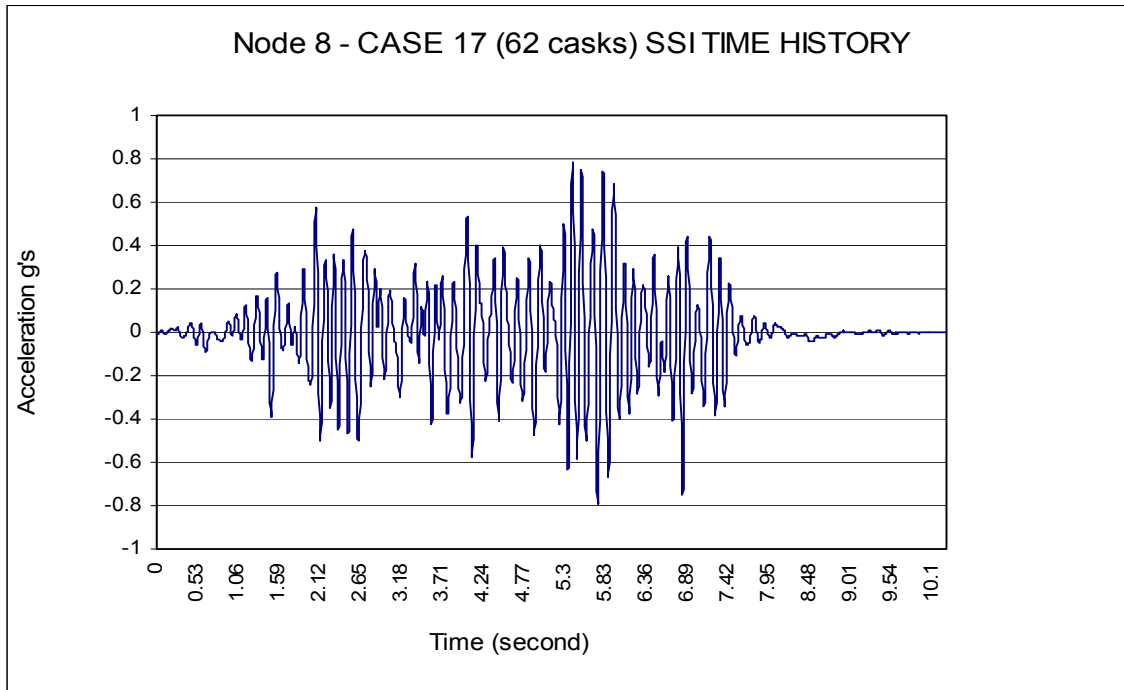


Figure 4-8
SASSI Output Time History at Node 11 – 62 Casks

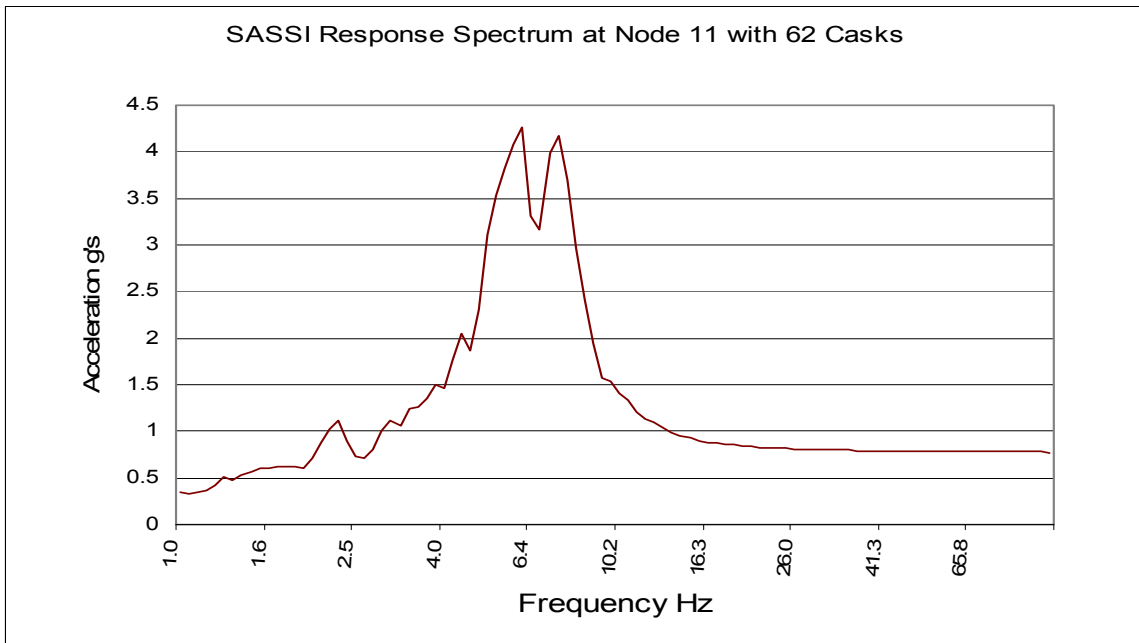
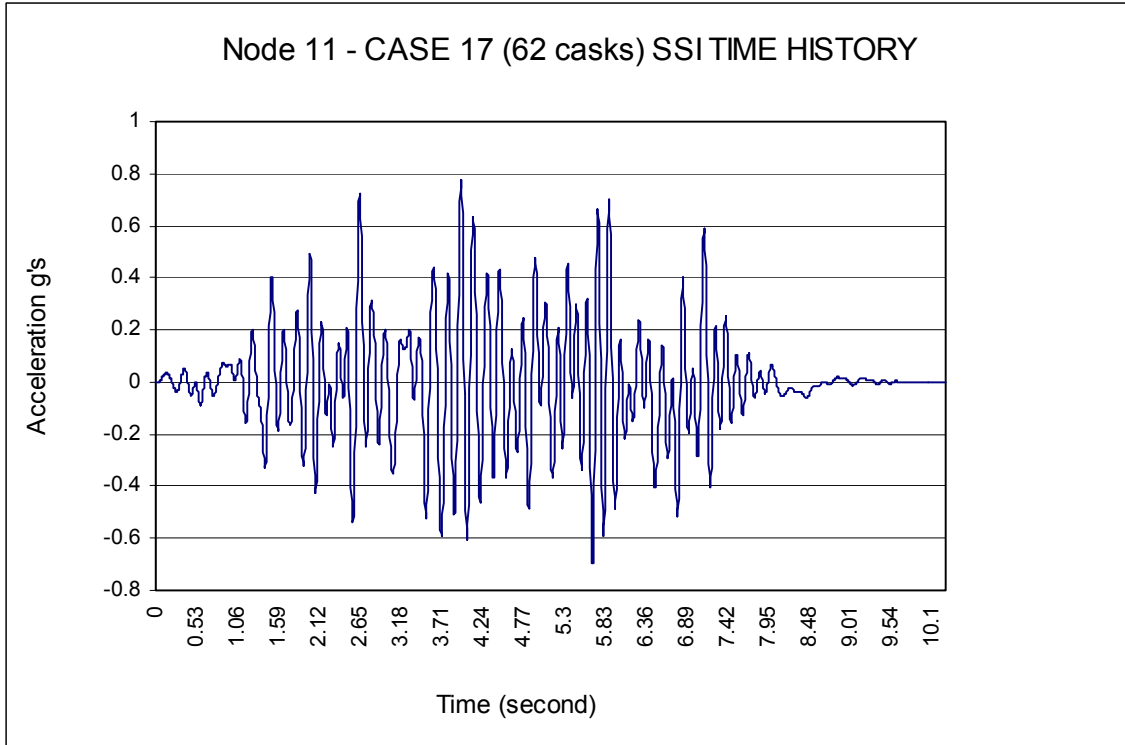


Figure 4-9
SASSI Output Time History at Node 37 – 62 Casks

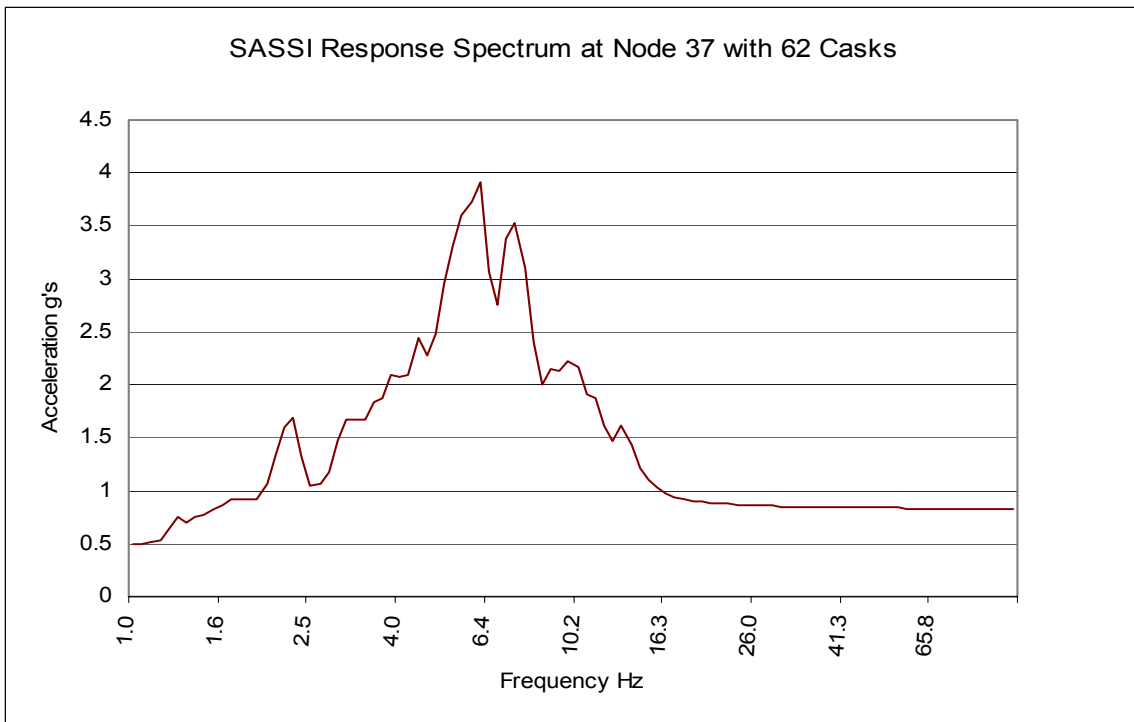
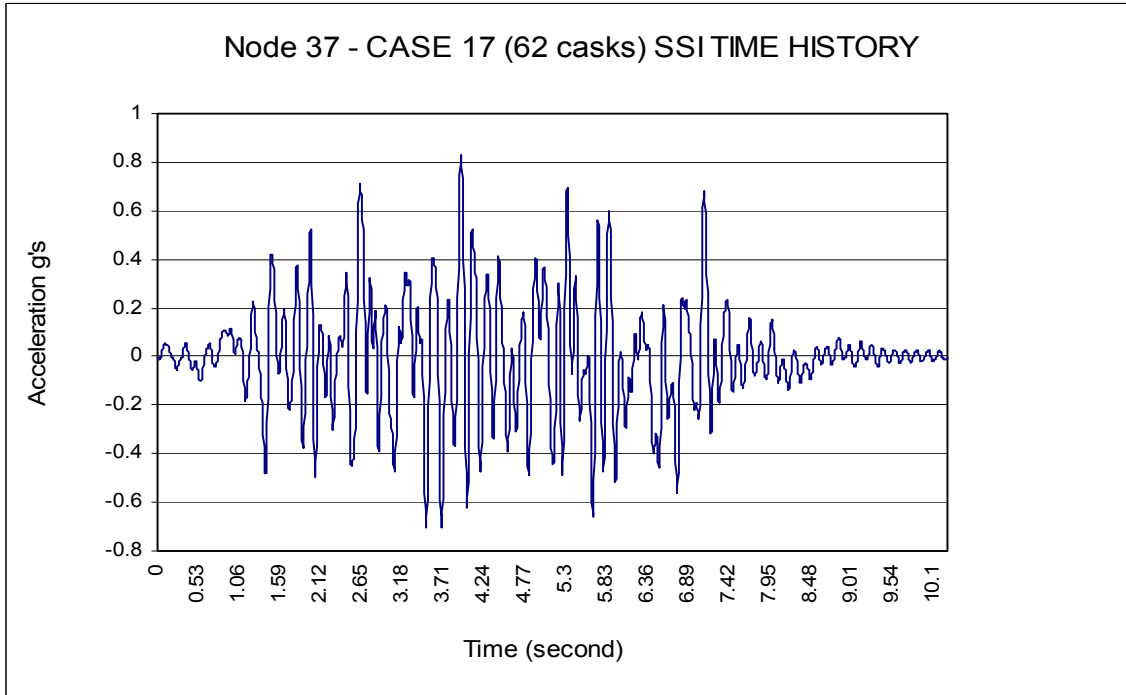
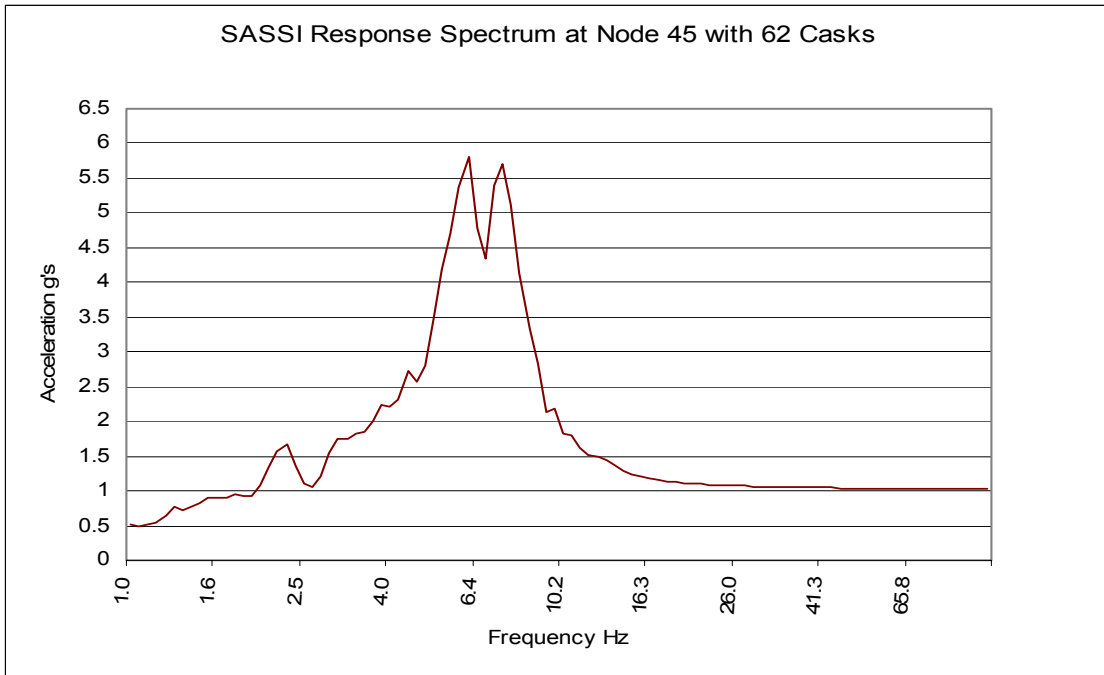
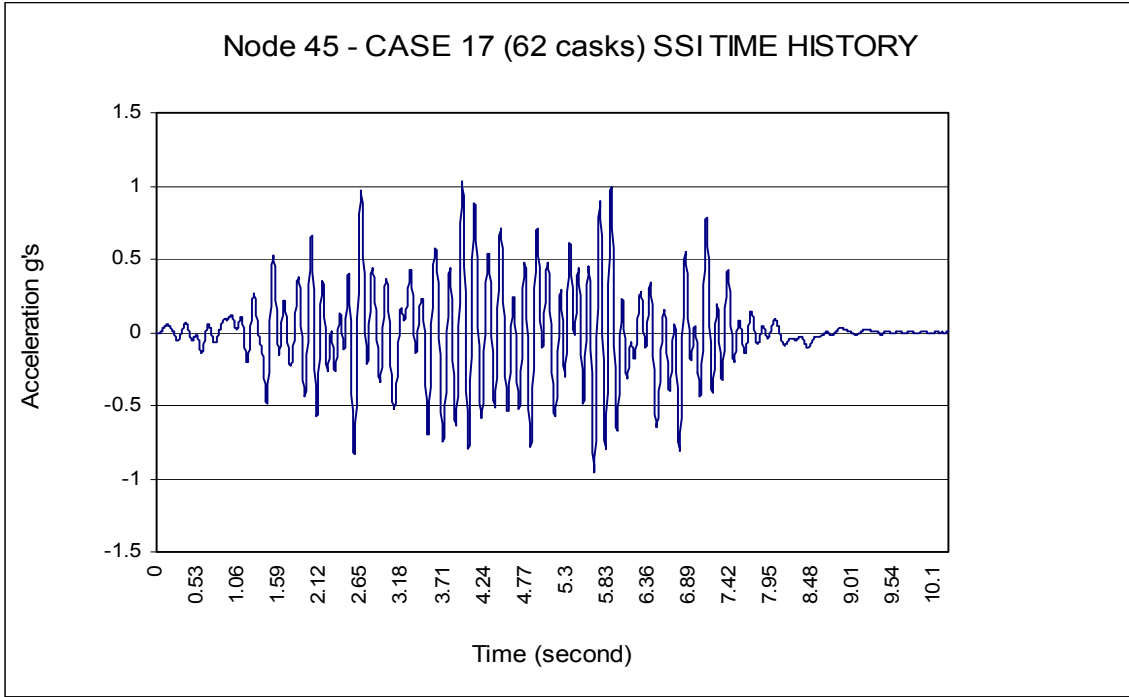


Figure 4-10
SASSI Output Time History at Node 45 – 62 Casks



REFERENCES

- 5.1 “Soil Report for First Nuclear Power Plants Spent Fuel ISFSI Project Site”, by CTCI Engineering
- 5.2 “User’s Manual for SHAKE91, A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits”, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering University of California, Davis, California
- 5.3 “A System for Analysis of Soil-Structure Interaction” User’s Manual, by The SASSI Development Team, John Lysmer, Geotechnical Engineering Division, Civil Engineering Department, University of California, Berkeley, California.

附錄 C 用過核子燃料乾式獨立貯存設施與受監測可取出的貯存設施之設計場址選擇所須考量的地質學及地震學的特徵

核能管制委員會

聯邦法規第10章 第72部

RIN 3150-AG93

**用過核子燃料乾式獨立貯存設施與受監測可取出的貯存設施之設計
場址選擇所須考量的地質學及地震學的特徵**

AGENCY: 核能管制委員會

ACTION: 最終條例

SUMMARY:

核能管制委員會(USNRC)修改其對用過核子燃料、高放射性廢料及高於C級核能相關廢料(Greater Than Class C, GTCC)放置於乾罐式之用過核子燃料乾式獨立貯存設施(Independent Spent Fuel Storage Installations, ISFSI)或美國能源部(U.S. DOE)之受監測可取出的貯存設施(Monitored Retrievable Storage Installations, MRS)的核照要求。此修改是將地質、地震及地震工程納入考量，以更新場址地震選擇及設計準則。最終條例可讓美國核管會及現有持照者雙方從現有設施的核照經驗中及納入地球科學(earth science)及地震工程技術的快速進展中獲得利益。此修改所制訂美國核管會規章，可使得ISFSI及MRS將核能電廠的地震危害分析不準度納入考量，以更符合1996年規定的要求。本項修改容許某些ISFSI或MRS 申請者，可使用與ISFSI或MRS廠址等量風險考量的設計地震值。

生效日期: 此規章於2003年10月16日起生效。

欲獲得進一步資訊請洽:

Keith K. McDaniel, Office of Nuclear Material Safety及Safeguards, U.S. Nuclear NRC Commission, Washington, DC 20555-0001, telephone:(301) 415-5252, e-mail: kkm@nrc.gov.

補充資訊:

I.	背景
II.	目標
III.	應用性
IV.	討論
V.	法規指引及標準審查計畫
VI.	推薦條例之公眾審查意見概要
VII.	最終版之概要
VIII.	Criminal Penalties
IX.	Agreement State Compatibility(各州間的相容性)
X.	Voluntary Consensus Standards(志願一致的標準)
XI.	Finding of No Significant Environmental Impact: Availability 沒有環境重大的衝擊的發現:可用性
XII.	Paperwork Reduction Act Statement (刪減紙上作業行動說明)
XIII.	管制分析
XIV.	管制審核的彈性
XV.	後續分析
XVI.	管制局對小商業所實施公平的行動

I. 背景

1980年美國核管會將聯想法規第10章第72部加入其規章，建立用過核子燃料及高放射性廢料(HLW, 45 FR 74693; November 12, 1980) 放置於用過核子燃料乾式獨立貯存設施(Independent Spent Fuel Storage Installations, ISFSI)的核照要求。1988年美國核管會修改第72部，提供用過核子燃料及高放射性廢料貯存於受監測可取出式的貯存設施(Monitored Retrievable Storage Installation (MRS, 53 FR 31651; August 19, 1988)的核照基礎。第72部的E次部中說明對ISFSI或MRS場址選擇，必須進行的調查與評估包含地質學及地震學特徵的等場址選擇評估因素的要求。對用過一年以上的核燃料、其他與用過核子燃料貯存有關係固態輻射物質及超C核能廢料(GTCC)，但尚未運送至高放射性廢料最終處置場或其他處理場前，ISFSI及MRS設施的設計與建造，可如同用過核子燃料池提供單一大量的乾式貯存結構進行中期貯存。

當ISFSI或MRS場址坐落於洛磯山西側(西經104度以西，以下稱美國西區)或洛磯山以東的地震活躍地區(西經104度以東，以下稱美國東區)時規章中要求，其地震評估須與核能電廠相同。地震設計的要求須與核能電廠相同(聯想法規第10章第100部附錄A) 是符合這些設備的設計，並設定其意外發生的可能症狀。

對於位於美國東區的其他場址，規章並未給予嚴格的限制。對其他形式的ISFSI或MRS，規章則要求進行場址的特定調查，對推薦的ISFSI或MRS場址特定要求項目，獲得合適的對應。美國核管會解釋對上述，如乾式貯存罐及密封罐等，不含重結構ISFSI，其設計地震要求將以逐例為基礎，直到從上述設施(45 FR 74697)執照的核發已獲得足夠經驗為止。

對於美國西區或美國東區的地震活躍帶，聯想法規第10章第72部規章現行要求依據第10章第100部附錄A的程序，進行場址設計基準地表運動的決

定。附錄A要求使用定性論法(deterministic)建立一套震源。執照申請者須對每一震源建立一個可能影響場址的預期地震以決定地表運動；依據說明訂定預期地震的位置，然後計算場址地表運動。由於地質及地震的科學進展及依據第10章第100部附錄A的一些核照過程未能發現或礙難適用的下列問題：

1. 由於定性論法中未包含地球科學參數的不準度。因此，地震危害度分析即以明確納入地表運動評估的不準度，並提供一套方法以評估各參數的敏感度。但於第10章第100部附錄A並未容許此應用。
2. 受限於地質/地震分析及數據，及地球科學知識的快速更新，已提供相當技術判斷的自由度。在附錄A中還禁止使用詳細地球科學評估所須的判斷，及在新位置應用基本原理的彈性。
3. 附錄A的不同節受到不同的解釋。例如各個專家對於須考慮的最大地震及所使用地表運動模式就有不同的見解，因此常使得核照過程變得漫長而無法預期。

1996年美國核管會修改聯邦法規第10章第50部及第100部(61 FR 65157; December 11, 1996)，將地質及地震工程考量納入作為未來新設核能電廠場址選擇評選準則的決策參數。

本項修改增加§ 100.23，要求經由適當的分析-如地震危害度分析或適當的敏感度分析，將不準度納入安全停機地震地表運動(SSE)的決定考量，以取代現行第10章第100部附錄A。基於過去20年的技術發展，此修改滿足上述所提到早期廠址選擇的三大問題。

因此，已經對此問題完成規章指引的發佈。例如，美國核管會提供核能電廠執照申請者規章指引1.165，「地震震源的確認及特性描述及安全停機地震地表運動的決定」及標準審查計畫NUREG-0800「核能電廠安全分報告審查的標準審查計畫」2.5.2節「地表震動」第三版。但是美國核管會仍於第100

部保留附錄A以維持現有電廠的核照基礎及限定新核能電廠使用§ 100.23。

美國核管會現在修改聯想法規第10章第72部以要求申請者某些地區須經由適當分析-如地震危害度分析或適當的敏感度分析，以說明地震危害分析的不準度，並制定其設計地震地表運動。聯想法規第10章第100部也平行改變對於場址選擇使用機率方式或適當的敏感度分析。

與核能電廠相較，運作中的乾式ISFSI或MRS設備用於貯存用過核子燃料是一種被動設備，其主要的動作在於廢料接收、吊運及貯存。ISFSI或MRS設備沒有如核能電廠支援安全運轉所須的多變與複雜的主動系統。因此，對堅固耐用的貯存罐設計並未考量地震的要求(例如：僅考慮墜落事件、屏蔽)，以確保地震事件下的低破壞機率。在不太可能發生的地震事件，結果下導致輻射外釋，其對工作者或大眾的輻射影響也均遠低於核能電廠的影響。可能造成大量輻射物質外釋或散佈的狀態要求，如高溫或高壓，其並不存在於ISFSI或MRS。這主要是由於用過核子燃料放入ISFSI或MRS貯存前，已經衰變超過一年，故其熱量產生速率及隨時可外釋到環境的易揮發輻射物質的存量已低。顯現於用過核子燃料之長衰變週期核種緊密的與燃料結合不易散佈。短衰變週期核種，如I-131，已不存在於用過核子燃料。此外，就假設燃料元件破裂出現短衰變週期核種，密封罐足以包封這些核種不致外釋。

第72部E次部的規範中的「場址選擇評估因素」及F次部「通用設計準則」是確保乾式貯存罐的設計是非常的堅固強壯。在多樣化的假設性非地震事件下，包含貯存罐墜落、傾倒及拋射物衝擊下，貯存罐均須維持其結構完整性。這些非地震事件對貯存罐完整性的挑戰遠較地震事件為大。因此，貯存罐抵抗來自於地震事件的力量所具有的實質設計裕度遠較設計地震為大。所以，運作中的ISFSI或MRS，由地震誘發風險低於運作中的核能電廠。基於上述結果，美國核管會更新ISFSI及MRS設備的設計地震要求，從現行第72部

要求，與核能電廠安全停機地震相同。

美國核管會僅對§ 72.212(b)(2)(i)(B) 增加一個小修訂，要求通用執照持照者在貯存罐基礎板及ISFSI區域的設計除靜態負荷外，須評估動態負荷，以確保貯存罐不會放至於未分析的條件。分析ISFSI基礎板及區域，計算動態負荷以確保於地震事件間基礎板可繼續支撐貯存罐。通用執照現行須對貯存罐、基礎板及區域進行動態負荷評估，以滿足§72.212(b)(2)(i)(A)要求貯存罐商品認證(Certificate of Compliance)的設計基礎。因此，本條例將不會實際要求運作中的通用持照者重新執行先前執行過的書面評估。基於 § 72.122(b)(2)，將要求特殊使用持照者所設計之ISFSI足以抵抗如地震及颶風等動態負荷影響。

美國核管會在2002年7月22日以Federal Register (67 FR 47745) 對大眾發行「用過核子燃料乾式獨立貯存設施及受監測可取出的貯存設施設計之場址選擇所須考量的地質學及地震學的特徵」建議條例以供大眾公開審閱。美國核管會並於2002年9月5日以67 FR 56876公文，將公眾審閱期限延長15天，以提供足夠時間讓對此議題有興趣者可提供有意義的評論。公眾審閱於2002年10月22日截止。美國核管會收到9項對於建議條例的評論意見。美國核管會將這些意見及對這些意見的回應的討論，列入本文第6節「公眾對建議條例的意見概要」。

II. 目的

ISFSI 的設計、建造與運轉須取得第72部的通用或特殊使用執照。第72部之特殊使用執照ISFSI執照是發給依據第72部規章申請之申請者。第72部通用執照是依據聯想法規第10章72.210，對符合第50部規定擁有一座核能電廠業者，不須依第72部提出執照申請所發行一個ISFSI執照。通用執照者須滿足第

72部K次部所列的要求條件。MRS可依據第72部特殊使用執照，由DOE負責設計、建造及運轉。

此最終條例的改變是企圖反應(1)提供應用現行規章及研究所獲得的經驗回饋與利益 (2)納入核照在地球科學及地震工程的現行最新技術(state-of-the-art)的進步，以提供管制所需彈性；及(3)讓規章顯現更多的風險告知，使其與管制委員會最近的政策保持一致。

本最終條例的目的是為了：1.要求位於美國西區及美國東區的已知地震活動帶之新的乾罐式貯存設備的特定執照申請者，且其位置不與核能電廠位於相同廠址時，當決定其設計地震時，需經由適當的分析-如地震危害度分析或適當的敏感度分析以說明地震危害分析的不準度。其他所有的新設乾罐式貯存設施特定執照申請者可選用其他方式以符合使用地震危害度分析或適當的敏感度分析的要求，以說明地震危害分析的不準度或其他符合現行規章(§ 72.103)的方法。2.所有新設ISFSI或MRS 特定執照的申請者使用地震危害度分析以選定其設計地震，可獲得與ISFSI或MRS一致的風險； 3.要求通用執照申請者其貯存罐基礎板及區域的設計除靜態負荷外(§ 72.212)，需計算其動態負荷。

III. 應用性

本節釐清§ 72.103對新設之特定執照及修正§72.212(b)(2)(i)(B)通用執照新章節的應用性。

新的 § 72.103 應用性

- (1) 在最終條例有效日起及以後的乾罐式貯存之ISFSI或MRS申請者，其廠址位於美國西區及美國東區的已知地震活動帶，且其位置不與核能電廠

位於相同廠址時；當決定其設計地震時，需經由適當的分析-如地震危害度分析或適當的敏感度分析以說明地震危害分析的不準度。

- (2) 在最終條例有效日起及以後的乾罐式貯存之ISFSI或MRS申請者，其廠址位於美國西區及美國東區的已知地震活動帶且其位置與核能電廠位於相同廠址時，其設計地震的決定，可經由適當的分析-如地震危害度分析或適當的敏感度分析，或使用其他選擇-使用現行核能電廠的設計準則，來說明其地震危害分析的不準度。當使用現行核能電廠的設計準則，評估多個核能電廠的ISFSI場址時，需使用最近核能電廠的設計準則。
- (3) 在最終條例有效日起及以後的乾罐式貯存之ISFSI或MRS申請者，其廠址不位於美國東區的已知地震活動帶。其設計地震的決定，可經由適當的分析-如地震危害度分析或適當的敏感度分析，或使用其他選擇-使用標準化核能電廠設計地震的適當的反應譜(0.25g subject to the conditions in new § 72.103(a)(1))，或使用現行最近核能電廠的設計準則，來說明其地震危害分析的不準度，並決定其設計地震。
- (4) 依據第72部美國通用執照的規定，最新的§ 72.103 並不適用於現行運轉之核能電廠的ISFSI通用執照。此變更適用於ISFSI及MRS之乾罐式貯存型態的設計，乃由於此兩種設備採用相似的設計。美國核管會並未企圖修訂聯辦法規第10章第72部，將地質學及地震學的準則納入濕式型態貯存的應用。此乃不預期使用此種貯存方式，且此種方式對確認震源的位置以建立法規條例擴展使用的技術基礎也不具經濟效率。由於對不使用罐式的乾式貯存設施缺乏核照的經驗，美國核管會同樣並不會修改聯辦法規第10章第72部地質學的及地震學的準則。

§ 72.103的應用性摘錄於下表：

修正 § 72.212(b)(2)(i)(B) 的應用性

基於§ 72.212(b)(2)(i)(B)中的變更, 所有ISFSI通用執照查照者須對貯存罐基礎板其區域進行動態負荷評估。 § 72.212(b)(2)(i)(B) 修正的應用性摘錄於下表。

應用性摘錄

[在最終條例有效日起即以後的乾罐式貯存之ISFSI或MRS特殊執照申請者
之設計地震地表運動申請者]

場址狀態	特定執照申請者
其廠址位於美國西區及美國東區的已知地震活躍區域且其位置不與核能電廠位於相同廠址時。	必須使用地震危害度分析或適當的敏感度分析以計算地震危害評估的不準度。
其廠址位於美國西區及美國東區的已知地震活躍區域且其位置與核能電廠位於相同廠址時。	使用地震危害度分析或適當的敏感度分析以計算地震危害評估的不準度。 或 現行核能電廠設計準則(多機組場址使用及與最近核能電廠的設計準則)。
其廠址不位於美國東區的已知地震活躍區域	使用地震危害度分析或適當的敏感度分析以計算地震危害評估的不準度 或

	<p>現行核能電廠設計準則(多機組場址使用及與最近核能電廠的設計準則)</p> <p>或</p> <p>合適的反應譜錨定在0.25g (subject to the conditions in new § 72.103(a)(1))。</p>
--	---

1 新§ 72.103設不適用於通用執照，通用執照必須符合聯邦法規第10章 72.212的條件。

2 在美國大陸，無論其地質調查的結果為何，其設計地震其水平設計地震反應譜，不得小於0.10 g。

IV. 討論

美國核管會正修正第72部某些章節以處理乾罐式貯存之ISFSI或MRS地震場址選擇及設計準則。美國核管會並保留§ 72.102 讓現有ISFSI 的核照基礎。美國核管會正變更§ 72.102的標題，並加入 § 72.103,及修正§ 72.212(b)(2)(i)(B)。

A. 聯邦法規第10章 72.102的變更

§ 72.102 的標題將變更，以說明此章節要求是針對本修正有效日以前所通過的ISFSI或MRS特定執照申請者。依據§ 72.102要求申請的 ISFSI或MRS 執照或非乾罐式貯執照將可繼續使用。

B. 新的聯邦法規第10章 72.103

新的 § 72.103 說明新乾罐式ISFSI或MRS貯存設施的特定執照申請者，需滿足的地震要求。

1. 從現行規章移除詳細的指引

第72部目前要求位於美國西區或東區已知地震活躍區域的ISFSI或MRS執照申請者，需符合10CFR100 附錄A。附錄A同時包含所需的要求及指導如何滿足各要求。例如附錄A第IV節中「所需的調查」說明調查的要求包含地表震動、表面斷層及地震誘發洪水及水波。然後於附錄A 對組成一個可被接受的調查提供詳細的指引。相似的狀況也顯現於第100部附錄A第V節「地震及地質設計基礎」。

地球科學 的評估需要相當高度的判斷因為(a) 有限的數據; (b)地質及地震分析方法的更新; (c) 快速累積的知識及(d)地球科學觀念的革新.美國核管會於1996年修正第100部同意此高度判斷。

但是，規章中列出特定詳細的地球科學評估將對申請者製造更大的障礙。同時美國核管會也被禁止所需的高度判斷。在核照的過程中禁止使用革新的方法(如機率論法)或於新狀態使用基本原理所需的彈性。美國核管會在第72部增加一個新節，以ISFSI或MRS提供特定場址選擇的要求，以取代參考規章的其他部。此規章的修訂經由條例中納入基本要求，以降低詳細的程度。並對符合要求的伴隨指引文件可接受方案提供詳細的步驟。如此，修正規章包含以下要求以: (i) 對預定廠址進行地質學與地震學及工程特徵的評估; (ii) 建立設計地震;及(iii) 基於上述要求確認不準度。

美國核管會可接受的詳細程序的指引請參考管制指引 3.73, 「用過核子燃料乾式獨立貯存設施及受監測可取出貯存設施廠址評估及設計地震地表運動的決定」。

2.使用機率論方法與說明不準度

現行決定ISFSI或MRS設計地震是基於定性論法(deterministic)的方法，具

體列於第100部附錄A。使用定性論法的申請者須建立一套震源，並對影響廠址地表運動的每一震源進行預期性地震分析作為地表運動的來源，並依據要求的條例，定位預期的地震然後計算場址地表運動。

儘管此種制定核能電廠場址安全停機地震的方式，在過去數十年被成功的應用，並顯示適度地保守性，但此方式仍未明顯的紀錄地球科學參數的不準度。由於對現震現象的了解有限(特別是美國東區)，各個專家對於須考慮的最大地震及所使用地表運動模式就有不同的見解，因此常使得核照過程變得漫長而無法預期。過去15-20年中對核設施地震安全的評估，所建立的機率論的方法，同意顯式納入不同的模式及地帶(zonation)、地震大小、地表運動及其他參數。使用此機率方法的優點是它們包含不同模式及數據的能力，由此提供一個地表運動評估不準度的明顯表示及評估不同輸入參數敏感度評估的方法。美國西區與東區的地質構造環境及構造變形的歷程有著基本上不同。因此，對機率方法論的應用，需視廠址構造環境變更基本地震危害度分析方法。

1996，美國核管會接受§ 100.23中使用地震危害度分析方法或適當的敏感度分析的方法，並認知地震學及地質學資訊的不準度需正式的評估，並適當的納入作為核能電廠安全停機地震之地震設計的決策。美國核管會進一步同意不準度的特性及合適的計算需基於對場址構造環境及地震危害度分析輸入參數的合宜描述。除地震危害度分析外，敏感度分析也適合探討某些廠址的不準度。

美國核管會了解某些ISFSI或MRS特定執照的新申請者，說明於本文第III節-應用性，必須使用機率方法或其他敏感度分析以取代第100部附錄A計算不準度。美國核管會並未企圖要求同坐落於核能電廠內部的新ISFSI或MRS 特殊執照申請者，說明由於評估現行核能電廠所使用的準則已可滿足ISFSI不準

度的評估。如本文第IV節所述，審核核能電廠執照所使用的安全性準則及地震導致ISFSI或MRS的風險遠較核能電廠為低。美國核管會對SFSI或MRS核照之地震及地質場址選擇方法的關鍵步驟包含

- a. 執行特定場址及區域的地球科學調查：
- b. 設定與ISFSI或MRS廠址目標一致的超越機率：
- c. 執行地震危害度分析並決定對應於目標超越機率的地表運動程度：
- d. 配合資訊的來源的變更，決定廠址可用的機率與數據：及
- e. 決定場址定反應形狀及配合地表運動程度調整此形狀。

另外，美國核管會將從先前的核照經驗中，詳細審核申請者所提供的數據及資訊。如此修正的方法，經由區域及場址特定的地球科學調查。區域及場址特定調查的結果必須用於機率的方法。美國核管會資助於Lawrence Livermore National Laboratory及Electric Power Research Institute執行的兩種目前地震危害度分析的研究，必須進行區域性的研究。區域及場址特定的調查提供詳細的資訊以更新場址特定地震危害度分析的數據。

申請者必須提供包含局部場址的地質學因數，例如地層學(stratigraphy)及拓樸學(topography)，及以計算特定場址的大地構造(geotechnical)特性建立設計地震。指引依據NUREG-0800, Section 2.5.2納入局部場址因素及地表運動衰變(attenuation)模式的進步，用以決定地表運動的評估。美國核管會對此關於地震危害度分析或適當的敏感度分析修正條例的可接受的方法說明於 RG 3.73.

3. 修正設計地震地表運動

現行第72部規定設計地震是基於聯想法規第10章第100部附錄A對於核

能電廠定性論的要求。在初始制定第72部條例的考慮說明(Statements of Considerations)，美國核管會認為不必如核能電廠設計地震相同等級的要求，且應以逐例審查為基準，直到從核照過程中獲得更多的經驗(45 FR 74697; November 12, 1980)。由於地震危害度評估技術進步、過去十多年乾罐式貯存核照的經驗(發行10 個特定執照及9 個通用執照)及分析顯示意外事故中乾罐式貯存系統堅固耐用的特性(Dry Cask Storage System. DCSS)，美國核管會目前已具備乾罐式設計之ISFSI或MRS，設計地震參數的更適當且合理的基礎。因此，以上述案例當 ISFSI或MRS 特殊執照申請者使用地震危害度分析方法，美國核管會將容許其設計地震與相關設施具有一致的風險。

- I. ISFSI或MRS較核能電廠導致較低輻射意外結果的風險因素包含如下：
 - a. 與核能電廠相較，運作中的乾式ISFSI或MRS設備用於貯存用過核子燃料是一種被動設備，其主要的動作在於廢料接收、吊運及貯存。ISFSI或MRS 設備沒有如核能電廠支援安全運轉所須的多變與複雜的主動系統。當裝填用過核子燃料後，ISFSI或MRS成靜態運作。
 - b. 正常操作時，並沒有組件含有高溫或高壓，發生大量輻射物質外釋條件並不存在。在正常操作或設計基準狀態意外下，會導致輻射物質外釋。但主要是由於用過核子燃料放入ISFSI或MRS貯存前，已經衰變超過一年，故其隨時可外釋到環境的熱量產生速率及易揮發輻射物質的存量已低。
 - c. 顯現於用過核子燃料之長衰變週期核種緊密的與燃料結合不易散佈。短衰變週期核種，如I-131，已不存在於用過核子燃料。此外，就假設燃料元件破裂出現短衰變週期核種，密封罐足以包封這些核種不致外釋。因此，美國核管會 認為地震誘發ISFSI或MRS輻射風險遠較核能電廠為低。

II. 容許使用與ISFSI或MRS相同風險的設計地震程度的其他的基本理由如下:

- a. 由於設計地震式定義為一條平滑的寬帶(Broad-Band)反應譜，它包含控制地震反應及保守的指定地表震動。
- b. 評估乾罐式貯存系統於地震時的特性；對震度範圍，執行典型的貯存系統（圓桶罐, HI-STORM 100, 其他的混凝土模組, NUHOMS）的地震分析。基於分析的結果，美國核管會獲得以下結論 自由站立之乾式貯存罐受相當於核能電廠安全停機等級的地震時，仍可保持穩定不會傾倒，或不會滑移及碰到連進的貯存罐。此外，經由參數研究顯示，乾罐式貯存系統在高於核能電廠安全停機地震作用時仍保有抵抗地震之相當的裕度，防止傾倒及滑移，沒有輻射物質外洩之慮。更進一步在地震事件中，分析貯存罐承受非機械性的傾倒事件，以釐清其可保有結構的完整性及輻射物質不會從用過核子燃料釋放到環境中。因此，基於掉落意外分析及非機械性的傾倒事件評估，及基於地震時貯存罐特性的研究結果，可獲得ISFSI或MRS 設備在地震發生時，不會放射性物質外釋的結果。
- c. 依據DOE 標準 DOE- STD-1020, "Natural Phenomena Hazrad Design Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities.", ISFSI或MRS的容許設計地震應較核能電廠低。管制指引 3.73 (formerly DG-3021) 對設計地震建議一個可接受的平均年超越機率(Mean Annual Probability of Exceedence, MAPE) 與核能電廠相較是採用與ISFSI或MRS一致的低風險。此建議的基礎文章請參見美國核管會公開電子

圖書室 (Public Electronic Reading Room <http://www.nrc.gov/reading-rm/adams.html>)，其標題為”Selection of the Design Earthquake Ground Motion Reference Probability.”。建議的年平均超越機率也同樣列於本文第VI節。

C. Change to 聯邦法規第10章 72.212(b)(2)(i)(B)的變更

美國核管會對§ 72.212(b)(2)(i)(B) 增加一個修訂，要求通用執照持照者在設計貯存罐基礎板及ISFSI區域時，除靜態負荷外，須評估動態負荷，以確保貯存罐不會放至於未分析的條件。在地震事件下，基礎板及區域除受到靜態負荷外，還承受其他的動態負荷。動態負荷是來自於區域、基礎板與貯存罐間的互動。設計ISFSI基礎板及區域時考慮動態負荷，可確保地震事件下，基礎板與區域的適用性。此修正同時要求進行土壤結構互制分析以了解地震放大效應及由地表震動導致土壤液化或其他土壤不穩定性的潛能。基於土壤與結構的特性，於自由地表(free-field)輸入歷時圖，將於地表基礎板位置放大。此放大的歷時圖必須受限於商品認證(Certificate of Compliance)之貯存罐可承受的加速負荷。地表震動導致土壤液化或其他土壤不穩定，將影響貯存罐的穩定性。

§72.212的修正並不會對通用執照持照者增加新的負擔，因為現行就須對貯存罐、基礎板及區域進行動態負荷評估，以滿足 §72.212 (b)(2)(i)(A)要求。§72.212 (b)(2)(i)(A)要求貯存罐商品認證(Certificate of Compliance)的設計基礎需考慮動態負荷-如地震颶風負荷的書面評估。基於 § 72.122(b)(2)，要求特殊使用持照者所設計之ISFSI足以抵抗如地震及颶風等動態負荷影響。

V.管制指引及標準審查計畫

美國核管會在2002年7月22日以Federal Register (67 FR 47745) 對大眾

發行DG-3021「用過核子燃料乾式獨立貯存設施及受監測可取出的貯存設施設計之場址選擇所須考量的地質學及地震學的特徵」建議條例以供大眾公開審閱(67 FR 48956; July 26, 2002)。管制指引 3.73, 「用過核子燃料乾式獨立貯存設施及受監測可取出貯存設施廠址評估及設計地震地表運動的決定」(formerly DG-3021), 提供美國核管會官員可接受的核照程序指引：

- (1) 執行詳細的場址區域地質及基礎穩定度評估;
- (2) 執行調查以確認及描述廠址區域震源的不準度對地震危害度分析的重要性;
- (3) 評估及描述地震震源參數的不準度;
- (4) 執行廠址地震危害度分析, 及
- (5) 決定滿足聯辦法規第10章第72部要求的設計地震值。

本指引說明一個可接受的程序及提供參考資料目錄, 並展現確定及描述可能構造震源或地震基因源的可接受方法。本補充資訊IV.B節, 說明管制指引的關鍵步驟。未來NUREG-1536, ” Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems”及NUREG-1567, ” Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities,”也將進行編輯上的變更。例如, 標準審查計畫將更新以參考§ 72.103及管制指引 3.73。

VI. Summary of Public 意見s on the Proposed 條例

略

VII. Summary of Final Revisions

This final rule will make the following changes to 10 CFR part 72:

Section 72.9 Information collection requirements: OMB approval

In § 72.9, the list of sections where approved information collection requirements appear is amended to add § 72.103.

Section 72.102 Geological and seismological characteristics (Current Heading)

Section 72.102 Geological and seismological characteristics for applications before October 16, 2003 and applications for other than dry cask modes of storage (New Heading)

The heading of § 72.102 is revised because § 72.103 is added for ISFSI or MRS applications after the effective date of the rule. Section 72.103 will only apply to dry cask modes of storage. Therefore, the heading of § 72.102 is being modified to show the revised applicability of this section. The requirements of § 72.102 will continue to apply for an ISFSI or MRS using wet modes of storage or dry modes of storage that do not use casks.

The NRC does not intend for existing part 72 licensees to re-evaluate the geological and seismological characteristics for siting and design using the revised criteria in the changes to the regulations. These existing facilities are considered safe because the criteria used in their evaluation have been determined to be safe for NPP licensing, and the seismically induced risk of an ISFSI or MRS is significantly lower than that of an NPP. The change leaves the current § 72.102 in place to preserve the licensing bases of present ISFSIs.

Section 72.103 Geological and seismological characteristics for applications for dry cask modes of storage on or after October 16, 2003

The trend towards dry cask storage has resulted in the need for applicants for new licenses to request exemptions from § 72.102(f)(1), which requires that for

sites evaluated under the criteria of Appendix A to Part 100, the DE must be equivalent to the SSE for an NPP. By making § 72.102 applicable only to existing ISFSIs and by providing a new § 72.103, the revised rule is intended to preclude the need for exemption requests from new specific-license applicants.

The new requirements in § 72.103 parallel the requirements in § 72.102. However, new specific-license applicants for sites located in either the western U.S. or in the eastern U.S. in areas of known seismic activity, and not co-located with an NPP, for dry cask storage applications, on or after the effective date of this rule, will be required to address the uncertainties in seismic hazard analysis by using a PSHA or sensitivity analyses instead of using the deterministic methods of Appendix A to Part 100 without sensitivity analyses. Applicants located in either the western U.S. or in areas of known seismic activity in the eastern U.S., and co-located with an NPP, have the option of using the PSHA methodology or suitable sensitivity analyses for determining the DE, or using the existing design criteria for the NPP. This change to require an understanding of the uncertainties in the determination of the DE will make the regulations compatible with 10 CFR 100.23 for NPPs and will allow the geological and seismological criteria for ISFSI or MRS dry cask storage facilities to be risk-informed.

New § 72.103(a)(1) provides that sites located in eastern U.S. and not in areas of known seismic activity, will be acceptable if the results from onsite foundation and geological investigation, literature review, and regional geological reconnaissance show no unstable geological characteristics, soil stability problems, or potential for vibratory ground motion at the site in excess of an appropriate response spectrum anchored at 0.2 g. Section 72.103(a)(1) will parallel the requirements currently included in § 72.102(a)(1).

New § 72.103(a)(2) provides that applicants conducting evaluations in accordance with § 72.103(a)(1) may use a standardized DE described by an

appropriate response spectrum anchored at 0.25 g. These requirements parallel the requirements currently included in § 72.102(a)(2). Section 72.102(a)(2) provides an alternative to determine a site-specific DE using the criteria and level of investigations required by Appendix A to Part 100. New § 72.103(a)(2) also provides, as an alternative, that a site-specific DE may be determined by using the criteria and level of investigations in new § 72.103(f). Section 72.103(f) is a new provision that requires certain new ISFSI or MRS license applicants to address uncertainties in seismic hazard analysis by using appropriate analyses, such as a PSHA or suitable sensitivity analyses, in determining the DE instead of the current deterministic approach in Appendix A to Part 100.

New § 72.103(a)(2) also provides that if an ISFSI or MRS is located at an NPP site, the existing geological and seismological design criteria for the NPP may be used instead of PSHA techniques or suitable sensitivity analyses because the risk due to a seismic event at an ISFSI or MRS is less than that of an NPP. If the existing design criteria for the NPP is used and the site has multiple NPPs, then the criteria for the most recent NPP must be used to ensure that the seismic design criteria used is based on the latest seismic hazard information at the site.

New § 72.103(b) provides that applicants for licenses for sites located in either the western U.S. or in the eastern U.S. in areas of known seismic activity, must investigate the geological, seismological, and engineering characteristics of the site using the PSHA techniques or suitable sensitivity analyses of new § 72.103(f). If an ISFSI or MRS is located at an NPP site, the existing geological and seismological design criteria for the NPP may be used instead of PSHA techniques or suitable sensitivity analyses because the risk due to a seismic event at an ISFSI or MRS is less than that of an NPP. If the existing design criteria for the NPP is used and the site has multiple NPPs, then the criteria for the most recent NPP must be used to ensure that the seismic design criteria used is based on the latest seismic

hazard information at the site.

New § 72.103(c) is identical to § 72.102(c). Section 72.103(c) requires that sites, other than bedrock sites, must be evaluated for the liquefaction potential or other soil instability due to vibratory ground motion. This is to ensure that an ISFSI or MRS will be adequately supported on a stable foundation during a seismic event. New § 72.103(d) is identical to

§ 72.102(d). Section 72.103(d) requires that site specific investigation and laboratory analysis must show that soil conditions are adequate for the proposed foundation loading. This is to ensure that an ISFSI or MRS will be adequately supported on a stable foundation during a seismic event.

New § 72.103(e) is identical to § 72.102(e). Section 72.103(e) requires that in an evaluation of alternative sites, those which require a minimum of engineered provisions to correct site deficiencies are preferred, and that sites with unstable geologic characteristics should be avoided. This is to ensure that sites with minimum deficiencies are selected and that an ISFSI or MRS will be adequately supported on a stable foundation during a seismic event.

New § 72.103(f) describes the steps required for seismic hazard analysis to determine the DE for use in the design of structures, systems, and components of an ISFSI or MRS. The scope of site investigations to determine the geological, seismological, and engineering characteristics of a site and its environs is similar to § 100.23 requirements. Unlike § 72.102(f), which requires the use of the deterministic method of Appendix A to Part 100, new § 72.103(f) requires evaluating uncertainty in seismic hazard analysis by using a probabilistic method, such as the PSHA, or suitable sensitivity analyses, similar to § 100.23 requirements for an NPP.

New § 72.103(f)(1) requires that the geological, seismological, and engineering characteristics of a site and its environs must be investigated in

sufficient scope and detail to permit an adequate evaluation of the proposed site and to determine the DE. These requirements track existing requirements in § 100.23(c).

New §§ 72.103(f)(2)(i) through (iv) specify criteria for determining the DE for the site, the potential for surface tectonic and nontectonic deformations, the design basis for seismically induced floods and water waves, and other design conditions. In particular, § 72.103(f)(2)(i) provides that a specific license applicant must address uncertainties in seismic hazard analysis by using appropriate analyses, such as a PSHA or suitable sensitivity analyses, for determining the DE. Sections 72.103(f)(2)(ii) through (iv) track the corresponding requirements in § 100.23(d).

Finally, the new § 72.103(f)(3) provides that regardless of the results of the investigations anywhere in the continental U.S., the DE must have a value for the horizontal ground motion of no less than 0.10 g with the appropriate response spectrum. This provision is identical to the requirement currently included in § 72.102(f)(2).

Section 72.212 Conditions of general license issued under § 72.210

Section 72.212(b)(2)(i)(B) is revised to require general licensees to address the dynamic loads of the stored casks in addition to the static loads. The requirements are changed because during a seismic event the cask experiences dynamic inertia loads in addition to the static loads, which are supported by the concrete pad. The dynamic loads depend on the interaction of the casks, the pad, and the foundation. Consideration of the dynamic loads, in addition to the static loads, of the stored casks will ensure that the pad would perform satisfactorily during a seismic event.

The new paragraph also requires consideration of potential amplification of earthquakes through soil-structure interaction, and soil liquefaction potential or

other soil instability due to vibratory ground motion. Depending on the properties of soil and structures, the free-field earthquake acceleration input loads may be amplified at the top of the storage pad. These amplified acceleration input values must be bound by the design bases seismic acceleration values for the cask, specified in the Certificate of Compliance. Liquefaction of the soil and instability during a vibratory motion due to an earthquake may affect the cask stability, and thus must be addressed.

The changes to § 72.212 are intended to require that general licensees perform appropriate load evaluations of cask storage pads and areas to ensure that casks are not placed in an unanalyzed condition. Similar requirements currently exist in § 72.102(c) for an ISFSI specific license and are now in § 72.103(c).

VIII. Criminal Penalties

略

IX. Agreement State Compatibility

略

X. Voluntary Consensus Standards

略

XI. Finding of No Significant Environmental Impact: Availability

略

XII. Paperwork Reduction Act Statement

略

XIII. 管制分析

委員會已完成管制分析 (RA) 標題為：“乾罐式用過核子燃料的獨立貯存設施設計之地質學及地震學的特徵管制分析”，管制分析是由委員會檢視其

經費及效益。此管制分析可由請參見美國核管會公開電子圖書室(Public Electronic Reading Room <http://www.nrc.gov/reading-readams.html>)，

XIV. 管制審核的彈性

依據管制局1980彈性綱領(Flexibility Act-5 U.S.C. 605(b))，委員會核定此條例不會實質少數單位的經濟產生重大衝擊。此條例影響條例生效日期起及其後之第72部ISFSI或MRS特殊執照申請者及通用執照申請者。這些公司並不一定是小公司“small entities”的規模。管制局在規章開始提出彈性綱領或小商業規模標準，依據小商業行政(Small Business Administration)所發行13 CFR Part 121。

XV. 後續分析

美國核管會已決定後續條例，72.62，並不應用於§§ 72.9, 72.102,及72.103。因此，後續分析不是要求這些規定. 72.212(b)(2)(i)(B)節目前要求貯存罐基礎板及區域進行靜態負荷評估。本節的修訂將要求通用執照持照者，評估動態負荷。在地震事件下，基礎板及區域除受到靜態負荷外，還承受其他的動態負荷。動態負荷是來自於區域、基礎板與貯存罐間的互動。設計ISFSI基礎板及區域時考慮動態負荷，可確保地震事件下，基礎板與區域的適用性。此修正同時要求進行土壤結構互制分析以了解地震放大效應及由地表震動導致土壤液化或其他土壤不穩定性的潛能。

基於土壤與結構的特性，於自由地表(free-field)輸入歷時圖，將於地表基礎板位置放大。此放大的歷時圖必須受限於商品認證(Certificate of Compliance)之貯存罐可承受的加速負荷。地表震動導致土壤液化或其他土壤不穩定，將影響貯存罐的穩定性。

§72.212(b)(2)(i)(B)的修正會衝擊ISFSI的操作程序，並因此牽連後續的條例。此變更將要求通用執照持照者執行合適的分析，以確定貯存罐地震設計基礎仍低於於特定廠址地震條件。此變更將要求通用執照者得貯存罐不會處於未分析得狀態。

因此，為了提供從業人員(occupational)及大眾的健康及安全的適當保護，這些變更是必須的。儘管委員會增加此後續分析以提供從業人員(occupational)及大眾的健康及安全的適當保護，§ 72.212的變更將不會實際地增加通用執照者額外的負擔，因為現行就須對貯存罐、基礎板及區域進行動態負荷評估，以滿足 §72.212 (b)(2)(i)(A)要求。§72.212 (b)(2)(i)(A)要求貯存罐商品認證(Certificate of Compliance)的設計基礎需考慮動態負荷-如地震颶風負荷的書面評估。基於 § 72.122(b)(2)，要求特殊使用持照者所設計之ISFSI足以抵抗如地震及颶風等動態負荷影響。§ 72.212(b)(2)(i)(B) 的變更不會對目前已有ISFSI設施的任何通用執照者，要求重新執行先前的書面評估。

XVI. Small Business Regulatory Enforcement Fairness Act

略。

List of Subjects In 10CFR Part 72

略。

附錄 D 管制指引 3.73

法規指引 3.73：

用過核子燃料乾式獨立貯存設施及受監測可取出貯存設施

廠址評估及設計地震地表運動的決定

(Site Evaluation and Design Earthquake Ground Motion for Dry Cask Independent Spent Fuel Storage and Monitored Retrievable Storage Installations)

A. 簡介

美國核管會最近發行聯辦法規 10CFR72 ”Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High Level Radioactive Waste, and Reactor-Related Greater Than Class C Waste.” 修正版，第 72.103 節“Geological and Seismological Characteristics for Application for Dry Modes of Storage on or after October 16,2003,”(f)(1)段，要求須對用過核子燃料中期貯存設施之場址的地質(geological)、地震(seismic)、工程特性(Engineering Characteristics)與環境(environs)，進行適當規模及詳細程度的調查，以提供制定預定廠址設計地震(Design Earthquake, DE)評估所需的充分資訊及評估與確認預定廠址之實際或可能存在的地質與地震影響，並採取適當的工程解決方案。在 10CFR72.103 第(f)(2)段要求所選擇廠址選擇的地質與地震等參數，需可足以建立廠址的設計地震、決定地質的表面構造及非構造的變形、地震誘發洪水及水波(海嘯)的設計基準及其他的設計條件。10CFR72.103(f)(2)(i)要求須納入適當的分析-如地震危害度評估(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PHSA)及合適的敏感度分析(Suitable Sensitive Study)，說明設計地震不準度的評估。

本指引為建立及提供一個美國核能管制委員會可接受的程序，以作為(1)

執行廠址區域之地質學、基礎穩定性的詳細評估。(2) 執行調查以確認及描述廠址區域震源的不準度對地震危害度分析的影響 (3) 評估與描述震源中的不準度參數(4)執行廠址地震危害度分析(5) 訂定符合 10CFR 72 的設計地震值。

這個指引含有數個附錄，以達成前面揭示的目標。附錄 A 為相關術語定義的列表。附錄 B 討論以機率方法論決定地表運動程度及控制地震，並建立地震危害資訊基礎。附錄 C 討論有關場址的地質學、地震學與地球物理科學的調查。附錄 D 提供確認現存震源的適當方法和決定廠址設計地震的震源參數基準。附錄 E 說明設計地震的建立程序。

參考機率(Reference Probability)及設計地震地表運動的年超越機率的基準列於本指引 3.4 節，相關討論請見「Selecting of Design Earthquake Ground Motion Reference Probability」[參考資料 D1]。

由於用過核子燃料乾式獨立貯存設施及美國能源部受監測之可取出貯存設施設計上十分相近。因此，本指引可作為兩者的設計基準。此外，由於不預期可能提出溼式貯置的方式，本管制指引 3.4 節的參考機率並不適用於溼式貯存。

本管制指引與 RG 1.165[參考資料 D2]規範內容一致，但透過乾罐式貯存設施的使用經驗及對地表運動模型的更進一步了解(例如參考 NUREG/CR-6728 [參考資料 D3]報告，對不同頻率的地表運動程度)，僅為配合 ISFSI 及 MRS 的應用對 RG 1.165 略作修訂。

本指引中所蒐集資訊包含於 10CFR50，10CFR50 已經由管理與預算辦公室簽證，簽證號 3150-3011。此外，美國核能管制委員會不指導、支援與負責相關地質資料之蒐集。

B. 討論

在 10 CFR 72.103 已確認地震危害度分析 (PSHA)是決定 ISFSI 及

MRS 設計地震的方法之一。此外，條例中亦認同地震和地質評估存在不準度，並可透過適當的方法，進行不準度評估。此管制指引更進一步解釋自然界的不準度及基於廠址構造環境的計算方式-適當的設定地震危害度分析之輸入參數(如震源、及相對於震源的地震再現機率、地表震動工程評估、最大震度及對地殼構造的了解程度)。因此，除機率方法外，其他如靈敏度分析，在某些場址也可適當的解釋不準度。

每一場址或貯存設施都是獨特的；因此，所須進行的分析與調查需求亦隨之變化，不可能提供一套程序可包絡全部的狀況。因此，如遇到本管制指引未註明之處，執照申請人可採取審慎合理的工程判斷。

過去 20-25 年間，對核能電廠的地震評估已建立了地震危害度評估的方法及程序。經由此套方法在美國核能設施(包含有反應器或沒有反應器的)及廠址的應用，美國西區(Western United States, WUS-指洛磯山脈(約西經 104 度以西地區)及美國東部與中部地區(Central and Eastern United States, CEUS，指洛磯山脈以東的地區穩)，基本上的地殼構造環境與構造變形歷程完全不同。經由地震危害度分析方法應用的結果，確認必須隨著廠址地質構造環境，變更所須採用的基本地震危害度分析方法。由這些應用的經驗同樣也可提供作為地震危害分析資深委員會(Senior Seismic Hazard Analysis Committee)制訂指導核設施執行地震危害度分析導則的基礎。

方法

訂定新的 ISFSI 或 MRS 場址之設計地震的通用程序包含：

- 1.進行場址及區域有關之地質學、地球物理學、地震學及地質工程技術的調查。
- 2.執行地震危害度分析或適當的敏感度分析。

當 ISFSI 廠址坐落於現有的核能電廠時，除現行核電廠使用的地質與

地震設計準則 (§72.103(a)(2) ,§72.103(b)) 之外，須視可用的資料與數據進行不同程度的評估。申請者應是否有新的數據，須重新評估先前以被接受的震源、地震再現機率及地表運動衰減模式。

美國中部與東部地區(CEUS)

美國東部與中部地區是指洛磯山脈以東的部分美國地區，或西經 104 度以東[參考資料 D6，D7]。為決定 CEUS 地區的設計地震，應使用可接受的地震危害度分析方法及可被接受及採信的輸入數據。對於 CEUS 的場址，Lawrence Livermore 國家實驗室 (LLNL) [參考資料 D4-D5,D7] 和美國電力研究所 (Electrical Power Research Institute, EPRI) [參考資料 D8] 已經所完成地震危害度分析方法、資料建立及震源的確認，並經核能管制委員會官員審查與接受。LLNL 和 EPRI 的研究已經建立數據資料庫並對可用的資訊提出科學的解釋，以決定 CEUS 地區的震源及其特性(例如地震發生率、最大地震值的估計)。

在 CEUS，震源的特性比美國西部(活躍的板塊邊緣地區)更難以決定，因為地震活動性與已知構造結構或近表面的地質間還沒有建立清楚的關聯。通常，觀察到的地質結構是因受到構造力作用而生成的，然此構造力現在多已不存在了，並與目前的地殼構造力僅存有些許關聯或甚至完全無關。因此，經由使用多種地震構造模式(Seismotectonic Models)以計算不準度是很重要的。

在 CEUS 區域震源的確認和的合理的選擇，是依據目前 CEUS 地區發生地震的假設 (例如，於脆弱區域方向的再啟動的可能性或地質集中於結構週遭應力的局部放大與釋放。在 CEUS 的構造活躍地區-例如 New Madrid 震區，其地質、地震與地球物理的證據可適當的推估產生地震的來源，通常使用美國西區制定震源的程序，可能更適於此地的震源評估。

美國西區

美國西區是指位於洛磯山以西，或西經 104 度以西的部分美國區域。美國西區的地球科學數據知識庫、震源及震源特性的科學解釋(例如幾何學、地震活動性參數)不如美國中區及東區(CEUS)豐富， LLNL 和 EPRI 對 CEUS 地區的研究文件[參考資料 D4-D5,D7,D9]。對於這個區域，應該以逐廠進行特定廠址的說明 [參考資料 D10,D11]。

此活躍板塊邊緣的地區包括加州、俄勒岡州、華盛頓州和阿拉斯加州的海岸。對此活躍板塊邊緣地區，已建立地震與第四紀已知斷層的近地表的往復運動關係，應評估這些結構之地震和表面變形的潛能。這個地區至少存在三種類型的震源：(1) 已知的或近表面的斷層，(2) 以摺疊方式潛存在於地球的表面之未知震源-盲斷層，(3) 潛沒區震源，例如位於西北太平洋的震源。使用傳統的表面與近表面的調查技術，以評估位移的方位、幾何形狀與指向、破斷的長度、第四紀的歷史等，可評估表面斷層的特性。

潛存的斷層震源經常是與摺疊、上升或沉降的地表變形有關。經由繪制上升或沉降的地質形態特性地圖或地層學、校平測量與大地測量學，能夠由找出隱藏斷層的表面特徵。通常可由深鑽孔和地球物理的技術能夠評估深度結構的性質。

美國大陸的潛沒區位於在西北太平洋和阿拉斯加。和全世界其他潛沒地區震源的比較，潛沒區的震源包含上疊板塊之內的震源、潛沒區與上疊板塊交界上的震源和其下海洋平板之內的震源。潛沒區的震源特性的考量包括潛沒板塊的三維幾何學、潛沒區的破裂段、破斷歷史的幾何形狀、上傾斜與下傾斜破斷程度的限制。

美國西區的 Basin 與 Range 地區，到小部分的西北太平洋和美國中區，

形成暫時性連串 (temporal clustering)地震。界於猶他州的 Wasatch 斷層地區和在俄克拉荷馬州中部的 Meers 斷層間的破斷歷史就是暫時性連串地震的最佳例證，那個地區在全新紀晚期經歷相當長時間(幾千至幾萬年)的靜止之後，於相當短的時間(幾百到幾千年)內發生好幾個很大的同震斷層事件(Holocene coseismic faulting events)。對此地區不論是否顯示曾經出現古地震的證據，均應考慮暫時性連串的地震。Non-Poissonian 模式對暫時性連串的地震尚無法提供很好的指引，因此，對暫時性連串的地震執行地震危害度分析需要另外進行判斷。

C 管制立場

1. 地質學、地球物理、地震學和地質工程技術調查

1.1 應完成廠址與周遭地區之地質、地震、地球物理與地質工程技術的廣泛調查

對於準備在現有的核能電廠的廠址內設置用核過燃料中期獨立貯存設施者，除可使用廠址原有的技術資料及其他可供提供的資訊之外，並須規劃進行額外規模的調查。本規範指引所說明的調查，主要是要蒐集確認合適性的廠址所需資料及蒐集與 ISFSI 及 MRS 建造及安全設計相關的數據。合適的地質學、地震學、與地球物理調查請參見本指引的附錄 C。地質工程技術調查請參見，法規指引 1.132 " 核能發電廠基礎的廠址調查" [參考資料 D12]及 NUREG/CR 5738[參考資料 D13]。其他廠址特定調查的重要目的是要了解，現存的地震危害度分析資料庫中所採用的資料，是否尚有未納入的更合適的新資料或解釋。附錄 D 說明廠址特定調查所獲得的新資料評估對地震危害度分析資料庫衝擊的評估方法。

執行調查共分為四個層次，調查的詳細程度是以與廠址的距離為基

準，包含第四紀構造區的性質、廠址和地區的地質學複雜性、可能的潛在震源與潛在表面變形等。調查地區和層次更詳細的討論以及理論基礎請參見本指引附錄 C。調查程度的一般指引如下：

1. 對廠址 320 公里半徑之內之地面實際偵察以確定震源 (seismogenic and capable tectonic sources 地震基因及可能的構造震源)應進行包括文獻回顧、地圖和遙感測量資料的研究，如果必要也可以執行廠址區域地質和地震調查並但不需十分詳盡。
 2. 對廠址半徑 40 公里(25 英里)內，應較區域地質執行更詳盡的地質、地震與地球物理調查，以確定和描述任何可能的潛在震源及地震與潛在表面變形，或說明不存在這樣的結構。在半徑 40 公里之內的可能震源，需要更廣泛的地質和地震調查和分析 (調查和分析的詳盡程度類似於通常用在半徑 8 公里 (5 英里)之內)。
 3. 廠址半徑 8 公里(5 英里)之內的地質、地震、地球物理與地質工程技術應該執行相當詳細的調查，以評估地面或近地表構造變形及廠址附近土壤和岩石的地表運動傳遞特性潛能。美國東區的新地質其未出現構造上的活動，可以不必調查的太詳細。評估地震基因源與地殼構造結構與地質的方法需依據參考資料 13。
 4. 廠址[大約 1 公里 (0.5 英里) 半徑]的地質、地震、地球物理與地質工程技術應該執行非常詳細的調查，以評估法規指引 1.132 [參考資料 D12]及 NUREG/CR 5738[參考資料 D13]中所說特定土壤和岩石的特性。
- 1.2 對於含有可能的構造震源、震活動性相對較高、複雜的地質或最近曾經歷大地震的區域，調查的範圍可以大於上述所列。
- 1.3 應提供充分的資料以釐清所有所有的假設及結論

因為工程解決辦法對於永久地表位移的效應，還不能給予一個令人滿意的答案。因此，要謹慎的避免廠址坐落於發生潛在表面或近表面的變形的區域。這樣的廠址通常需要廣泛的額外調查。

1.4 對於廠址與廠址附近區域，應確認岩性、地層圖、水文與構造地質條件。

調查應該包括測量及評估廠址下方地層/土壤材料靜態和動態工程性質，以及關於地震發生前廠址下方表層與下層材料行為的自然證據。應測量包括土壤液化的潛能及下方材料傳遞地震地面運動至電廠基礎行為(例如震波速度、密度、含水率、滲透性、彈性模數和強度)的相關性質，因為地表下方材料行為是在評估地震發生時所需要。

2. 廠址地震危害的重要震源

2.1 位於 CEUS 的電廠，雖然已經使用 EPRI 或 LLNL 的地震危害度分析方法和資料庫來決定設計地震，可能仍需要調查和說明先前未知或未描述的潛在震源，並執行靈敏性分析以評估它們對地震危害估計的重要性。依據附錄 D，應使用法規立場 1 中所討論的調查結果，來決定 LLNL 或 EPRI 的震源和是否應更新震源特性。如果調查的結果發現額外的震源，可使用下面管制立場 2.2 與 2.3 的說明與本指引附錄 C 的方法。

2.2 當未使用 LLNL 和 EPRI 的方法或 LLNL 和 EPRI 的方法不適用時，應該依據法規立場 2.3 中的原則以確認和描述震源。在描述震源時，應適當的說明不準度。震源包含震波基因源和可能的構造震源的一般術語。這兩種類型的震源的主要區別是震波基因源不產生表面位移，但可能的構造震源會產生表面或近表面的位移。

震源的確認和描述應該基於區域和廠址的地質和地球物理的資料、歷史和儀器紀錄的地震活動性資料、區域應力場和史前地震的地質證據。在附錄 C 中描述了確定震源的調查。應該用文件說明震源確認的基礎。

附錄 C 中也提供了震源需評估特性的一個通用列表。

2.3 應該評估每個震源的地震潛能，以作為震源特性的一部分。典型的地震潛能的特性是由四個同樣重要的部分組成。

1. 選取震源空間的(Spatial)地震分佈模型。
2. 選取震源暫時的(Temporal)地震分佈模型。
3. 選取相對地震頻率不同震度的模型，包括對在目前構造區域下的震源可能發生的最大的地震估計。
4. 完整的不準度描述。

例如，在 LLNL 研究使用一個截斷的指數模型，以表示震源所產生震度的分佈。使用一個穩定的波桑(Poisson)過程以作為震源發生空間和暫時的地震模型。評估地震潛力和描述不準度的一般討論，請參閱 Senior Seismic Hazard Analysis Report (參考資料 5)。

2.3.1 位於 CEUS 地區的廠址，當沒使用 LLNL 或 EPRI 的方法時或其方法不適用時 (如在新馬德里地震區中 New Madrid Seismic Zone)，則必要對每一個震源進行地震潛力評估。可以使用過去核能管制委員會審照決策中已經接受的震源和數據，或執行管制立場 1 所說的調查及資料蒐集。

通常，因為導致地震的根本原因存有不準度，在 CEUS 地區的震源屬於地區震源。此不準度是由於缺少活躍表面斷層、低地震活動率和較短的歷史記錄。CEUS 地區震源地震復發的評估，通常大部分是依賴地震活動性的觀察編錄。但是因為這些編錄並不完整且相對僅為很短的時間，很難獲得活動率的可靠估計。對於不完整性資訊的修正與地震復發率模型的不準度需要相當的小心。為完整的說明某一震源的地震潛力，必要估計在目前構造區域之震源可

能產生的最大的震度。所估計的震度即定義為地震復發關係的上界。

地區震源最大地震的主要評估方法通常包含歷史地震活動記錄的考慮、地震活動的模式和比率、第四紀（2 百萬年以後）、震源的特性、目前的應力（它與已知構造結構是如何安排）、古地震資料和對其與 CEUS 地區構造相似之其他地區震源的分析。由於低地震活動率和較短的歷史記錄，因此需要相當程度的判斷。這對於地震潛能評估中最大不準度的說明是非常重要的。

2.3.2 對於美國西區的廠址，其地震通常已建立與已知構造的結構關係。地震經常能夠與已知的構造的架構聯繫。就斷層而言，地震潛能是與未來預期的破裂特性有關，例如全部的斷裂區域、長度或斷層位移量。以下的經驗公式可從斷層的性質資料估計地震潛能及估計某一震度地震下的可能位移量。謹慎的使用幾個不同的關係式以取得震度的估計。

- 相對震度的表面破裂長度(參考資料 14-18)，
- 相對震度的次表面破裂長度(參考資料 19)，
- 相對震度的破裂面積(參考資料 20)，
- 相對震度的最大和平均位移(參考資料 19)，
- 相對震度的滑動率(參考資料 21)。

當使用參考資料 15-21 的關係式，地震潛能通常是以分佈的方式評估。評估中困難的問題是適當破裂尺寸的使用，這需要以疑

似斷層地質數據和相同類型的其他區域斷層系統的行為作為基礎以進行判斷。

除了最大震度，復發機率模式的其他元素可用地震的紀錄、斷層滑動率和其他的資料。所有影響不準度的因素必須適當納入。

2.3.3 對於西北太平洋和阿拉斯加等靠近潛沒區的廠址，最大震度的決定是依據潛沒區震源的評估。儘管各板塊間也會發生很大的地震依據全球的觀察顯示最大已知地震是發生在板塊交界位置。依據可能的破裂尺寸或全球其他相似潛沒區震源，可評估板塊交界的地震震度。

3.地震危害度分析程序

對廠址進行地震危害度分析，可採用多種模型以估計廠址可能的地震地面運動。並有系統地計算影響地震危害度分析不準度各項參數(例如震源，最大地震和地表運動的衰減)。在地震危害度分析以定量方式考慮其他的假設。其他的假設在重要參數中也可以作為評估不準度危害靈敏度的和確定每一個震源對危害的相對貢獻。

下面的步驟說明核能管制委員會可接受的執行地震危害度分析的一個程序。

3.1.依據法規立場 1 與附錄 C, 執行區域和廠址的地質、地震和地球物理調查。

3.2.位於 CEUS 的廠址，依據附錄 D 執行 LLNL 或 EPRI 的震源評估以決定是否與步驟 1 所蒐集廠址特定資料一致或需要更新。如果新的資訊顯示目前的版本，嚴重的高估危害度並有堅強技術基礎支持版次更新，則可重新進行地震危害度分析。在大多情況下，有限範圍的靈敏度研究應該足夠說明及包絡(envelop)從廠址特定調查的所有結果對地震危害度分析的現存資料庫的影響。通常，LLNL 和 EPRI 資料庫的重大修訂是採取定期的(每

隔 10 年)，或當有重要新發現或地震發生時。任何重大的更新應該依據參考資料 5 的導則。

3.3. 位於 CEUS 地區的廠址，可依據步驟 2 決定使用原始的或更新的震源，執行 LLNL 或 EPRI 的地震危害度分析。美國西區或其他地區的廠址，需執行廠址特定的地震危害度分析(參考資料 6)。地表運動的估計應基於自由地表的岩石條件或非岩石的廠址的假設的岩石條件以建立附錄 B 所討論的地震危害資訊庫。

3.4. 使用年平均參考機率 $5E-4$ /yr (參考資料 1)，使用 5% 臨界阻尼決定 1 Hz 及 10 Hz 的頻率之地面運動譜。

3.5. 依據附錄 B 分散平均危害度特性，以決定主控地震 (controlling earthquake)。在附錄 B 也討論危害資訊的文件。

3.6. 主控地震的決定除使用上述管制立場 3.4 及 3.5 方法外，亦可採用以下方式：

- a. 使用年平均參考機率 $5E-4$ /yr (參考資料 1)，使用 5% 臨界阻尼，以計算對 ISFSI 或 MRS 有影響地震頻率之地面運動譜。
- b. 包絡所有的反應譜，以決定其設計地震。

4. 訂定設計地震的程序

在完成地震危害度分析 (參見法規立場 3) 和決定主控地震，應採用以下的程序決定設計地震。附錄 E 含有一些設計地震特性的附加討論。

4.1. 對於法規立場 3 所描述和使用 Standard Review Plan (SRP) 第三版 2.5.2 節的程序而決定的主控地震 (此可能包含使用未列入地震危害度分析，但更適合於震源、區域、所考慮的廠址或最近科學研究的發現的地表運動模型)，對實際或假設岩石條件建立 5% 臨界阻尼的反應譜。相同的主控地震也可用於推導垂直反應譜。

- 4.2. 以 $S_{a,10}$ 相對於主控地震值進行反應譜形狀的放大或縮小。如果主控地震 $S_{a,10}$ ，可用相同方式以 $S_{a,1}$ 相對之主控地震值進行反應譜形狀的放大或縮小。否則，以下列步驟使用包絡低頻反應譜的修正形狀或使用兩個反應譜。對於岩石廠址請跳至管制立場 4.4。
- 4.3. 對非岩石廠址，執行廠址特定的土壤放大效應分析以考慮地質工程技術性質的不準度及決定對於真實廠址條件之自由地表(free-field)的自由地面(free ground surface)的反應譜。
- 4.4. 相對於平滑的設計地震反應譜與或依據管制立場 2 對岩盤廠址或管制立場 3 對非岩盤廠址所決定的反應譜，以評估設計地震反應譜的合適度。
- 4.5. 基於廠址特定反應譜所決定的設計地震，依據管制立場 2、3 建立平滑寬帶包絡反應譜

D.執行

本文的目的是提供申請者與持照者了解核能管制委員會官員使用此法規指引的計畫。

除了申請者提出一個符合委員會管制所指定規範的可接受替代方法的範例，核能管制委員會官員將使用此方式，評估 2003 年 10 月 16 日以後送件的新建 ISFSI 及 MRS。如果建照是在 2003 年 10 月 16 以前通過，不會以此指引進行評估。

參考資料

- D1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Selection of the Design Earthquake Ground Motion Reference Probability," SECY-03-0118, Attachment 4, July 2003.
- D2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion," Regulatory Guide 1.165, March 1997.
- D3. R.K. McGuire, W.J. Silva, and C.J. Constantino, "Technical Basis for Revision of Regulatory Guidance on Design Ground Motions: Hazard- and Risk-Consistent Ground Motion Spectra Guidelines," NUREG/CR-6728, October 2001.
- D4. D.L. Bernreuter et al., "Seismic Hazard Characterization of 69 Nuclear Plant Sites East of the Rocky Mountains," NUREG/CR-5250, Volumes 1-8, 1989.
- D5. P. Sobel, "Revised Livermore Seismic Hazard Estimates for Sixty-Nine Nuclear Power Plant Sites East of the Rocky Mountains," NUREG-1488, U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 1994.
- D6. R.J. Budnitz et al., "Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts," NUREG/CR- 6372, Volumes 1 and 2, USNRC, April 1997.
- D7. J.B. Savy et al., "Eastern Seismic Hazard Characterization Update," UCRL-ID-115111, Lawrence Livermore National Laboratory, June 1993.3 (Accession number 9310190318 in NRC's Public Document Room)
- D8. Electric Power Research Institute (EPRI), "Probabilistic Seismic Hazard Evaluations at Nuclear Power Plant Sites in the Central and Eastern United States," NP-4726, All Volumes, 1989-1991.
- D9. Electric Power Research Institute (EPRI), "The Earthquakes of Stable Continental Regions," Volume 1: *Assessment of Large Earthquake Potential*,

- EPRI TR-102261-V1, 1994.
- D10. Pacific Gas and Electric Company, "Final Report of the Diablo Canyon Long Term Seismic Program; Diablo Canyon Power Plant," Docket Nos. 50-275 and 50-323, 1988.
- D11. H. Rood et al., "Safety Evaluation Report Related to the Operation of Diablo Canyon Nuclear Power Plant, Units 1 and 2," NUREG-0675, Supplement No. 34, USNRC, June 1991.
- D12. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Site Investigations for Foundations of Nuclear Power Plants," Regulatory Guide 1.132, Revision 1, October 2003.
- D13. N. Torres et al., "Field Investigations for Foundations of Nuclear Power Facilities," NUREG/CR-5738, USNRC, 1999.
- D14. K.L. Hanson et al., "Techniques for Identifying Faults and Determining Their Origins," NUREG/CR-5503, USNRC, July 1999.
- D15. D.B. Slemmons, "Faults and Earthquake Magnitude," U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Misc. Papers S-7-1, Report 6, 1997.
16. D.B. Slemmons, "Determination of Design Earthquake Magnitudes for Microzonation," *Proceedings of the Third International Microzonation Conference*, University of Washington, Seattle, Volume 1, pp. 119-130, 1982.
- D17. M.G. Bonilla, H.A. Villalobos, and R.E. Wallace, "Exploratory Trench Across the Pleasant Valley Fault, Nevada," Professional Paper 1274-B, U.S. Geological Survey, pp. B1-B14, 1984.
- D18. S.G. Wesnousky, "Relationship Between Total Affect, Degree of Fault Trace Complexibility, and Earthquake Size on Major Strike-Slip Faults in California" (Abs), *Seismological Research Letters*, Volume 59, No. 1, p. 3, 1988.
- D19. D.L. Wells and K.J. Coppersmith, "New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface

Displacement,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 84, 1994.

D20. M. Wyss, “Estimating Maximum Expectable Magnitude of Earthquakes from Fault Dimensions,” *Geology*, Volume 7 (7), pp. 336-340, 1979.

D21. D.P. Schwartz and K.J. Coppersmith, “Seismic Hazards: New Trends in Analysis Using Geologic Data,” *Active Tectonics*, National Academy Press, Washington, DC, pp. 215-230, 1986.

D22. U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants,” NUREG-0800, Section 2.5.2, Revision 3, 1997.2

附錄 E 『用過核子燃料中期貯存設施於地震事件下結構完整性』計畫報告審查意見及回覆

『用過核子燃料中期貯存設施於地震事件下結構完整性』審查意見及回覆		
頁次	審 查 意 見	核 研 所 答 覆 內 容
	報告內容及計畫名稱所提及之「用過核燃料」，請統一更正為「用過核子燃料」；另使用之單位(公制或英制)及內容多處錯字，請重新檢視修正並統一	敬依委員指示修訂。
	本報告內容非個人專業，無法就內容之正確性或所使用之分析評估方法之適當性進行判斷；為報告嚴謹、內容充實值得肯定。	謝謝委員肯定。
P8	本計畫捨棄常用的剛性支撐假設，改採土壤結構互制分析。請教其意義為何？兩分析方法所求得結果是否會有很大差異？	依據 10CFR72 最新法規，已將土壤-結構互制納入規範，本計畫成立之初，即由國外專家獲得相關資訊需進行土壤結構互制分析以考慮土壤對設計頻譜的放大效應。其放大效果更為明顯。因此，美國核管會強制要求基礎板需進行動態分析，而且不可以採用彈性基礎方式(Elastic Foundation)進行簡化分析。若以設計反應譜進行分析，則僅需參考核一廠樓板設計反應譜進行動態分析即可。採用土壤-結構互制分析，不論是分析的詳細程度與分析工作量，相對多了很多。
P9	請說明摩擦係數範圍取 0.2~0.6，最大加速度範圍取 0.3g 至 0.8g 代表的意義。	主要是模擬不同的地震程度及地表接觸條件對貯存罐地震分析的影響。所取的範圍是期望包絡全部的地震狀態，配合最新土壤-結構互制分析的結果，報告已經將地震加速度提升到 1.0g。
P.9	請說明本計畫採用摩擦係數 0.2~0.6 之理由，為何不考慮 0.8 (如 Sandia National Lab)？	參考國外相關研究，對混凝土間的接觸之摩擦係數一般採用 0.2~0.6。至於採用 0.8 的摩擦係數，相對提升貯存罐抵抗滑動地震能力，相對降低位移量；但卻增加傾倒的可能性，但就本計畫分析結果顯示，當發生 1.0g(最大)地震時，貯存罐最大傾角為 1.59 度。因此，增加摩擦係數雖能增加貯存罐的傾角，但亦不致發生貯存罐傾倒的可能。
P.11	核二廠冷卻池喪失安全餘裕時間應為民國 104 年，請向核二廠確認後修正之	依據核二廠用過燃料池目前正進行的格架佈局在重整簡報資料，核二廠用過燃料池預計於 96~97 年用罄，但若原能會核准進行再次格架佈局將可提升至 104 年~105 年。
P13	COGIMA 是否為 COGEMA 之筆誤	謝謝委員指正。

『用過核子燃料中期貯存設施於地震事件下結構完整性』審查意見及回覆		
P.15	HI-STORM 100 System 共有三種型式，如 100, 100S, and 100A/SA(plus anchors)，請增列並概述之	HI-STORM 100A 及 HI-STORM 100SA 是 HI-STORM 100 族群的第三種變化，它特別的地方是具有延伸的底板以及三角襯料 (gusset)，以便能將外圍護箱錨定在 ISFSI 的基礎板上，係屬於高耐震之應用。其貯存罐的主要尺寸與重量與 100/100S 相同，將敬依建議修訂於報告中。
P.18	報告內提及核一廠計畫貯存場址之邊坡抵抗沖刷能力甚差，亦可能發生滑動，請問因地震發生落石或土壤液化現象的可能性？	依據中期貯存場址地質鑽探報告 4.4 節評估說明，可採多設地下排水管排導地下水，再加上地表回填土增加圍壓解決 C3 局部液化的可能。就整體而言，廠址並無土壤液化的問題。另外，4.5 節亦對邊坡穩定提供建議處理方式包含(1)地面排水設計(2)坡面與坡頂的處理方式，4.6 節也對坡地開發的擋土牆結構形式設計提供建議。
P19	C:系統「組」尼；筆誤。	謝謝委員指正。
P37	目前單位都採用公制，此處採用英制有無特別考量？	採用英制乃是配合原廠設計所顯示的尺寸。為配合原廠設計資料，建議報告中繼續採用英制以符合一致性。
P.37	就工程實務而言，地質鑽探資料應取多少鑽孔資料方能代表該現地之地質、土壤特性，與最終分析結果之客觀性又是為何？	就核一廠中期貯存廠址而言，益鼎與泰興分別進行過兩次地質鑽探調查，分別完成 12 孔及 14 孔鑽探，相對廠址的調查密度已算相當高。然不論如何鑽孔所取得的地質資料均存在地質調查的不準度問題。因此，RG 3.73 才要求進行將此不準度納入考量進行地震危害度分析，以包絡其地質調查的不準度及制定廠址的設計地震。
P.44	將圖 4.3 之地震歷時圖以等比例放大至所需的地震強度 0.5g 和 0.8g 後，請問有效作用時間亦同為 10 秒嗎？國外研究方法是否亦如此進行放大地震強度？	依據核一廠設計反應譜以 STARDYNE 程式所建立的歷時圖在 10 秒後其地震反應已經回到 ZPA，意即 10 秒的歷時圖足以反應其地震狀態。當然，若核一廠發生 0.5g 或 0.8g 的地震，其終期安全分析報告中的設計反應譜必須進行重新制定，方可進行對應的分析。
P.46	分析結論提及護箱可能發生滑動，應以適當方式固定，請問您的建議為何？	經由所獲得的資料，固定方式有採拉力鋼索、固定螺栓及加裝方形底部固定板等方式。但以重量 100 噸以上的貯存罐若加裝固定，則需要相當數量的拉力鋼索或固定螺栓，如此將妨礙對 ISFSI 設施的檢查與維護，就目前分析結果顯示，貯存罐移動仍不致發

『用過核子燃料中期貯存設施於地震事件下結構完整性』審查意見及回覆

		生碰撞意外，因此，並無加裝固定設施的必要。此外，加裝方形底板是為防止圓筒型貯存罐晃動，同時亦可降低貯存罐的移動，倒是可以考慮的方式。									
	<p>敬報告所進行之 NUHOMS 與 HOLTEC 系統分析，於下表情形下會造成滑動或翻覆</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NUHOMS</th> <th>HOLTEC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>滑動</td> <td>$a_h > 0.429g$</td> <td>$a_h > 0.429g$</td> </tr> <tr> <td>翻覆</td> <td>$a_h > 0.448g$</td> <td>$a_h > 0.404g$</td> </tr> </tbody> </table>		NUHOMS	HOLTEC	滑動	$a_h > 0.429g$	$a_h > 0.429g$	翻覆	$a_h > 0.448g$	$a_h > 0.404g$	<p>報告中所提以準靜態方式進行地震穩定性分析結果如右表所示，其分析之假設為克服靜摩擦就會產生滑移，重心移動超過底面積範圍就會發生翻覆，是一種相當保守的估算方式，可作為定性分析的參考。本報告更以最新歷時圖執行非線性動力分析，其結果不但可顯示貯存罐移動的距離，並且可計算實際動態負荷作用時的傾角，結果顯示最大滑移量為 37.8 公分。</p>
	NUHOMS	HOLTEC									
滑動	$a_h > 0.429g$	$a_h > 0.429g$									
翻覆	$a_h > 0.448g$	$a_h > 0.404g$									
	<p>為避免護箱或模組於地震作用下產生滑動或翻覆，可否檢討相關影響因子，並提出改善措施，供本局審查參考：</p> <ol style="list-style-type: none"> 在規範上可否提出核一廠中期貯存設施應至少具備之耐震設計臨界值， 如何改善筏基 (pad) 或土壤與結構之作用機制，以防止護箱或模組產生滑動或翻覆現象， <p>在不變更設施設計，有否簡便方法可提升護箱或模組之耐震能力，其影響如何。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 貯存罐要抵抗地震不產生滑移，可採用拉力鋼索、固定螺栓及加裝方形底部固定板等方式固定。但相對將造成維修及檢查時的障礙。 依據 10CFR72 規定，核一廠用過核子燃料中期獨立貯存設施場址之屬通用執照範圍，可依據其按照廠址設計地震要求進行地震動態分析。 基本上，依據非線性地震動態分析的結果顯示，基礎板(Pad)上的貯存罐會發生滑移，但不會傾倒。如要防止滑移可參考第 1 項建議。 在不變更護箱設計上，對一個重達 100 噸以上的貯存罐，實難有簡便的方法提升其抗震能力。 									
P.69	<p>於最大水平地表加速度 0.8g 條件下，水平位移達 64cm，是否可能滑出 concrete pad 而造成翻覆，請確認？</p>	<p>參考核一廠地質鑽探報告附錄 14 之圖一，混凝土桶貯存設施平面圖，貯存罐與基礎板邊界之間距為 85.512 公分，固貯存罐發生地震時應不致滑出基礎版，亦無造成翻覆的疑慮。</p>									