

附錄六.二.A 結構計算說明

目 錄

(斜體字章節內含 NAC Proprietary Information 之相關內容)

六.二.A 結構計算說明.....	6.2.A-1
1 燃料提籃有限元素模型.....	6.2.A-1
(1) 負載路徑描述.....	6.2.A-1
(2) 有限元素模型描述.....	6.2.A-2
(3) 有限元素模型邊界條件.....	6.2.A-3
(4) 有限元素分析結果之後處理.....	6.2.A-4
2 密封鋼筒有限元素模型.....	6.2.A-21
3 混凝土護箱有限元素模型.....	6.2.A-44
(1) 熱應力分析之混凝土護箱有限元素模型.....	6.2.A-44
(2) 傾倒分析之混凝土護箱有限元素模型.....	6.2.A-44
4 傳送護箱有限元素模型.....	6.2.A-52
(1) 傳送護箱垂直吊舉.....	6.2.A-52
(2) 密封鋼筒傳送時意外吊舉.....	6.2.A-52
5 土壤結構互制分析有限元素模型.....	6.2.A-56
6 混凝土護箱在混凝土基座上的穩定度分析.....	6.2.A-63
7 傳送護箱傾倒分析有限元素模型.....	6.2.A-69
8 混凝土護箱傾倒意外情況之提籃穩定度分析(斜體字部分為 NAC Proprietary Information).....	6.2.A-74
9 混凝土護箱傾倒意外之燃料方管塑性分析.....	6.2.A-96
10 密封鋼筒提籃有限元素模型.....	6.2.A-98
11 參考文獻.....	6.2.A-103

圖目錄

圖 6.2.A.1-1 燃料提籃擴展圖	6.2.A-6
圖 6.2.A.1-2 螺栓固定圖	6.2.A-7
圖 6.2.A.1-3 燃料提籃局部模型-0°提籃角度.....	6.2.A-8
圖 6.2.A.1-4 提籃局部模型-45°提籃角度.....	6.2.A-9
圖 6.2.A.1-5 定位銷連接有限元素模型(NAC Proprietary Information).....	6.2.A-10
圖 6.2.A.1-6 定位銷連接有限元素模型(NAC Proprietary Information).....	6.2.A-10
圖 6.2.A.1-7 燃料方管定位銷有限元素模型(NAC Proprietary Information) ..	6.2.A-11
圖 6.2.A.1-8 燃料提籃模型邊界條件-0°提籃角度之徑向負載.....	6.2.A-12
圖 6.2.A.1-9 燃料提籃模型邊界條件-45°提籃角度之徑向負載.....	6.2.A-13
圖 6.2.A.1-10 提籃熱應力邊界條件	6.2.A-14
圖 6.2.A.1-11 燃料方管陣列-0°提籃角度.....	6.2.A-15
圖 6.2.A.1-12 燃料方管陣列-45°提籃角度.....	6.2.A-16
圖 6.2.A.1-13 彎角支撐銲件截面-0°提籃角度(NAC Proprietary Information).....	6.2.A-17
圖 6.2.A.1-14 彎角支撐銲件截面-45°提籃角度(NAC Proprietary Information).....	6.2.A-18
圖 6.2.A.1-15 側邊支撐銲件截面-0°提籃角度(NAC Proprietary Information).....	6.2.A-19
圖 6.2.A.1-16 側邊支撐銲件截面-45°提籃角度(NAC Proprietary Information).....	6.2.A-20
圖 6.2.A.2-1 密封鋼筒有限元素模型	6.2.A-25
圖 6.2.A.2-2 密封鋼筒分析應力線性化之截面	6.2.A-26
圖 6.2.A.3-1 混凝土護箱熱應力分析有限元素模型	6.2.A-48
圖 6.2.A.3-2 混凝土模型-鋼筋元素	6.2.A-49
圖 6.2.A.3-3 混凝土邊界條件	6.2.A-50
圖 6.2.A.3-4 傾倒分析有限元素模型	6.2.A-51
圖 6.2.A.4-1 傳送護箱有限元素模型	6.2.A-54
圖 6.2.A.4-2 傳送護箱保護環有限元素模型	6.2.A-55
圖 6.2.A.5-1 ISFSI 系統的結構模型	6.2.A-58
圖 6.2.A.7-1 傳送護箱有限元素模型	6.2.A-70
圖 6.2.A.7-2 密封鋼筒有限元素模型	6.2.A-71
圖 6.2.A.7-3 防撞緩衝器有限元素模型	6.2.A-72
圖 6.2.A.7-4 加載時傳送護箱傾倒下之有限元素模型	6.2.A-73
圖 6.2.A.8-1 燃料方管彎角之提籃定位銷方管槽連接(NAC Proprietary Information).....	6.2.A-80
圖 6.2.A.8-2 燃料提籃於混凝土護箱傾倒有限元素模型-0°提籃角度(NAC Proprietary Information).....	6.2.A-81
圖 6.2.A.8-3 燃料提籃於混凝土護箱傾倒有限元素模型-22.5°提籃角度.....	6.2.A-82
圖 6.2.A.8-4 燃料提籃於混凝土護箱傾倒有限元素模型-45°提籃角度.....	6.2.A-83

圖 6.2.A.8-5	燃料提籃有限元素模型-彎角支撐鉸件之軀連接	6.2.A-84
圖 6.2.A.8-6	燃料提籃有限元素模型-側邊支撐鉸件之軀連接	6.2.A-85
圖 6.2.A.8-7	燃料提籃穩定性分析之加速度歷時圖	6.2.A-86
圖 6.2.A.8-8	0°提籃角度燃料方管鉗-槽連接之最大位移(NAC Proprietary Information)	6.2.A-87
圖 6.2.A.8-9	22.5°提籃角度燃料方管鉗-槽連接之最大位移(NAC Proprietary Information)	6.2.A-88
圖 6.2.A.8-10	45°提籃角度燃料方管鉗-槽連接之最大位移(NAC Proprietary Information)	6.2.A-89
圖 6.2.A.8-11	0°提籃角度燃料方管彎角最大間隙改變量之歷時圖(NAC Proprietary Information)	6.2.A-90
圖 6.2.A.8-12	22.5°提籃角度燃料方管彎角最大間隙改變量之歷時圖 (NAC Proprietary Information)	6.2.A-91
圖 6.2.A.8-13	45°提籃角度燃料方管彎角最大間隙改變量之歷時圖 (NAC Proprietary Information)	6.2.A-92
圖 6.2.A.8-14	45°燃料提籃支撐鉸件之軀連接 G2 位置之間隙歷時圖 (NAC Proprietary Information)	6.2.A-93
圖 6.2.A.8-15	45°燃料提籃支撐鉸件之軀連接 G1 位置之間隙歷時圖 (NAC Proprietary Information)	6.2.A-94
圖 6.2.A.9-1	燃料提籃燃料方管位移之有限元素模型	6.2.A-97
圖 6.2.A.10-1	密封鋼筒-燃料提籃有限元素模型於混凝土護箱傾倒意外 -45°提籃角度	6.2.A-99
圖 6.2.A.10-2	密封鋼筒-燃料提籃有限元素模型於混凝土護箱傾倒意外 -22.5°提籃角度	6.2.A-100
圖 6.2.A.10-3	密封鋼筒殼體側向位移圖-45°提籃角度	6.2.A-101

表目錄

表 6.2.A.2-1	密封鋼筒正常壓力加操作, P_m , MPa	6.2.A-27
表 6.2.A.2-2	密封鋼筒正常壓力加操作, $P_m + P_b$, MPa	6.2.A-28
表 6.2.A.2-3	密封鋼筒正常壓力加操作, $P + Q$, MPa	6.2.A-29
表 6.2.A.2-4	密封鋼筒正常壓力, P_m , MPa	6.2.A-30
表 6.2.A.2-5	密封鋼筒正常壓力, $P_m + P_b$, MPa	6.2.A-31
表 6.2.A.2-6	密封鋼筒熱應力, Q , MPa	6.2.A-32
表 6.2.A.2-7	密封鋼筒異常壓力加操作, P_m , MPa	6.2.A-33
表 6.2.A.2-8	密封鋼筒異常壓力加操作, $P_m + P_b$, MPa	6.2.A-34
表 6.2.A.2-9	密封鋼筒異常壓力加操作, $P + Q$, MPa	6.2.A-35
表 6.2.A.2-10	密封鋼筒正常壓力加異常操作, P_m , MPa	6.2.A-36
表 6.2.A.2-11	密封鋼筒正常壓力加異常操作, $P_m + P_b$, MPa	6.2.A-37
表 6.2.A.2-12	密封鋼筒意外壓力加自重, P_m , MPa	6.2.A-38
表 6.2.A.2-13	密封鋼筒意外壓力加自重, $P_m + P_b$, MPa	6.2.A-39
表 6.2.A.2-14	密封鋼筒傾倒加正常壓力, P_m , MPa	6.2.A-40
表 6.2.A.2-15	密封鋼筒傾倒加正常壓力, $P_m + P_b$, MPa	6.2.A-41
表 6.2.A.2-16	密封鋼筒正常壓力加 60 g 加速度垂直負載, P_m , MPa	6.2.A-42
表 6.2.A.2-17	密封鋼筒正常壓力加 60 g 加速度垂直負載, $P_m + P_b$, MPa	6.2.A-43
表 6.2.A.5-1	場址設計參數	6.2.A-59
表 6.2.A.5-2	地質調查之土壤數據(Best Estimate, BE)土壤數據	6.2.A-60
表 6.2.A.5-3	下界限(Lower Bound, LB)土壤數據	6.2.A-61
表 6.2.A.5-4	上界限(Upper Bound, UB)土壤數據	6.2.A-62
表 6.2.A.8-1	燃料提籃定位銷槽之最大間隙變化(<i>NAC Proprietary Information</i>)	6.2.A-95
表 6.2.A.10-1	燃料提籃穩定性分析 LS-DYNA 模型之鋼筒殼體側向位移 邊界條件	6.2.A-102

六.二.A 結構計算說明

本附錄敘述六.二節結構評估及六.六節意外事故評估中引述之相關計算細節。

1 燃料提籃有限元素模型

(1) 負載路徑描述

此節說明燃料提籃之負載路徑，確保系統在所有貯存情況下的結構完整性。本系統之燃料提籃可容納 87 束 BWR 燃料束，於正常貯存狀態下，密封鋼筒底板直接地支撐燃料束重量，而提籃僅承受自重。引發提籃側向負載的異常或意外情況，包括異常操作負載、混凝土護箱傾倒意外等，此時由 45 個燃料方管、側邊支撐鉸件和彎角支撐鉸件承受燃料束重量。如圖 6.2.A.1-1 所示，透過燃料方管彎角的承壓接觸(bearing contact)，燃料方管間得以傳遞負載，如圖中位置‘1’。承壓接觸包含兩種負載路徑：一是由聯結插銷傳遞燃料方管與燃料方管間的負載；二是燃料方管承壓接觸部位所傳遞的承壓負載，而剪力負載經由定位銷截面傳遞到定位銷槽內之承壓面上。有關燃料方管彎角內之詳細說明如圖 6.2.A.1-2 所示，其中，燃料方管彎角所鉸接的定位銷會搭配在鄰近方管之定位銷槽內。分析過程中，因提籃各組件間之摩擦力有折減衝擊能量的效應，基於保守分析原則，提籃之有限元素分析不考慮摩擦力的作用。

雖然燃料方管頂部與底部的聯結插銷組件有額外支撐提籃的效果，但因為聯結插銷組件不能傳送側向方向的負載，故提籃末端的裝置不會影響局部模型之分析結果。安裝聯結插銷組件主要為了維持提籃系統結構裝置的穩定，且底部聯結插銷組件除了維持密封鋼筒底板與燃料方管間的平衡，也將提籃之承壓負載傳遞到密封鋼筒底板。

彎角支撐、側邊支撐鉸件與燃料方管陣列(Array)以螺栓與殼方式連接固定，以提供提籃之剛性。鉸接在燃料方管上之殼將開槽並嵌進鉸件內，藉由墊片和螺栓結合固定，如圖 6.2.A.1-1 與圖 6.2.A.1-2 之圖示位置 ‘2’ 所示。此螺栓接合處主要傳遞張力負載，因此一旦裝載後將產生張力之預負載。剪力負載主要由殼、殼鉸件和支撐鉸件相互影響所形成，如圖 6.2.A.1-2 位置 ‘3’ 所示。若支撐鉸件擠壓在燃料方管陣列上，將由支撐鉸件和燃料方管陣列間之承壓接觸傳遞負載，如圖 6.2.A.1-2 位置 ‘4’ 。

(2) 有限元素模型描述

此節將說明提籃有限元素模型之結構計算，下表為有限元素模型與 ASME 相關應用法規。

有限元素模型	說明	負載條件	ASME 規範章節
3D 局部模型	密封鋼筒異常操作狀況 (燃料提籃側向負載)	Level C	III-NG
3D 熱應力模型	熱應力評估	Level A	III-NG
3D 局部塑性模型	混凝土護箱傾倒意外事故評估	Level D	III-NG, App. F

A 燃料提籃三維局部模型

以兩種三維半對稱的燃料提籃局部有限元素模型，計算密封鋼筒異常操作引發側向負載的提籃模型內部應力。此兩種模型的差別在於不同的提籃角度，分別為 0° 和 45° 之提籃角度，如圖 6.2.A.1-3 和圖 6.2.A.1-4 所示。燃料方管支撐定位銷軸中心至另一支支撐定位銷軸中心的間距為 254 mm (10.0 in)，因此局部模型以方管定位銷之軸中心點至兩個方管定位銷間距的中心點 254 mm (10.0 in) 為一個切割。

有限元素模型使用 ANSYS 軟體之 SOLID45、SHELL43、CONTAC52、LINK10 及 COMBIN40 等元素建構，其中燃料方管陣列、定位銷和側邊支撐鉸件為 SOLID45 元素。有限元素模型內之燃料方管側面的碳鋼材料，藉由修正其密度以同時考慮中子吸收板(poison plates)重量。垂直壁與支撐板上的彎角支撐鉸件為 SHELL43 元素。燃料方管、彎角支撐組件和側邊支撐組件間的相互影響由 CONTAC52 間隙元素建構，此間隙元素容許提籃結構組件間的負載傳遞，而燃料方管或定位銷的相互影響也是使用 CONTAC52 建構。提籃結構分析不考慮密封鋼筒組件，而是透過 CONTAC52 元素模擬提籃與傳送護箱之間的總間隙。圖 6.2.A.1-5、圖 6.2.A.1-6 及圖 6.2.A.1-7 為詳細定位銷連接有限元素模型。

在半對稱提籃模型的 12 個螺栓位置上，以螺栓固定彎角支撐與側邊支撐組件於燃料方管陣列上。螺栓與軀的連結，以拉伸元素 LINK10 建構螺栓元件以及 COMBIN40 元素建構軀。COMBIN40 元素可以表現出燃料方管上之軀鉸件所產生的剪力拘束。

六.二.A.1.(3)節說明負載與邊界條件，而中子吸收材料與保護板並沒有建立在有限元素模型內，而是藉由修正燃料方管之碳鋼密度，以模擬中子吸收材料與保護板之重量。

B 燃料提籃三維熱應力模型

針對熱應力結構計算之評估，其有限元素模型與 6.2.A.1.(2).A 節所敘述之 0° 燃料提籃三維局部模型相同。ANSYS 軟體之結構元素首先轉換成相對應之熱傳元素(SOLID70, SHELL57 和 LINK33)，進行熱傳分析計算模型內之溫度分佈，作為熱應力分析之根據。

C 燃料提籃三維局部塑性模型

使用兩種(0° 、 45°)三維燃料提籃局部塑性局部模型(plastic periodic model)評估護箱傾倒事件中的燃料提籃。此分析模型大部分與六.二.A.1.(2).A 節之局部模型相似(圖 6.2.A.1-3 與圖 6.2.A.1-4)，其主要差別為此模型中的元素採用彈性-塑性(elastic-plastic)之材料性質(螺栓除外)。負載與邊界條件說明於六.二.A.1.(3)節，而中子吸收材料與保護板並沒有建立在有限元素模型內，而是藉由修正燃料方管之碳鋼密度，以模擬中子吸收材料與保護板之重量。

(3) 有限元素模型邊界條件

A 異常操作之邊界條件

依照六.二.A.1.(2).A 節敘述之三維局部模型，考慮異常操作情況引發提籃之側向負載，以計算提籃模型內之應力分佈。提籃與傳送護箱間的總間隙為 15.7 mm (0.62 in)，其中提籃與密封鋼筒間距為 3.0 mm (0.12 in)且密封鋼筒與傳送護箱間距為 12.7 mm (0.50 in)。為了表示燃料束的負載，以一涵蓋性的壓力負載施加在燃料方管上。

圖 6.2.A.1-8 與圖 6.2.A.1-9 分別為 0° 與 45° 之提籃模型。異常事件情況下，於提籃側向施加 0.707g 之慣性負載(主要由兩個夾角 90° 之 0.5g 加速度向量合成之結果)，因此施加於燃料方管之壓力負載亦要乘上 0.707g。

0° 與 45° 之提籃模型主要是用來說明提籃所承受的側向負載， 0° 之提籃模型使燃料方管側壁上有最大應力，而 45° 之提籃模型使燃料方管彎角有最大的彎曲應力。因為 0° 與 45° 方位之模型應力為兩種最嚴苛的情況，足以涵蓋燃料提籃的所有方位的情況，因此僅分析此兩種模型即可。局部有限元素模型之對稱邊界條件，

除了施加在對稱平面上，亦要施加在有限元素模型兩端。傳送護箱內之提籃與密封鋼筒的間隙使用 CONTACT52 元素建造，而間隙元素外部的節點以固定拘束。在異常事件分析中，因為使用低溫的彈性係數會有稍微較高的應力結果，故保守地使用 38°C (100°F) 之碳鋼材料性質。

B 熱應力之邊界條件

根據六.二.A.1.(2).B 節敘述之三維模型，計算因熱膨脹產生的熱應力。考慮提籃之軸向與徑向最大溫度梯度(ΔT)，以涵蓋所有貯存與運送情況。提籃之熱分析邊界條件為提籃中間部位 385°C (725°F)，邊緣部位為 204.4°C (400°F)，如圖 6.2.A.1-10 所示，並藉由這些溫度邊界條件以熱傳導分析計算模型內之溫度分佈，再由這些溫度分佈計算模型之熱應力。將對稱邊界條件施加於對稱之平面上，但僅在模型任一末端予以軸向方向拘束。

C 混凝土護箱傾倒意外之邊界條件

此節將敘述混凝土護箱傾倒時，燃料提籃側邊的衝擊分析。在此衝擊期間，加速度變化由混凝土護箱底部的 1g 到密封鋼筒頂部的最大值。使用六.二.A.1.2.C 節敘述之局部塑性模型，並保守施加 35g 的邊界加速度於燃料提籃以涵蓋六.二.(六).4.(3).E 節混凝土護箱傾倒時的密封鋼筒 29.6g 的最大加速度，此 35g 為混凝土護箱傾倒意外事故時，考慮動態負載因子後的燃料提籃最大加速度。

如六.二.A.1.(3).A 節的說明，0° 與 45° 之燃料提籃模型足以涵蓋燃料提籃在傾倒意外之側向負載，因此依然採用此兩種方位之模型。對稱邊界條件施加於對稱平面與三維局部模型之兩端，混凝土護箱內的提籃與鋼筒外殼的間隙使用 CONTACT52 元素建造。混凝土護箱傾倒意外時，提籃周圍間隙元素之外部節點使用密封鋼筒殼體的位移。邊界條件如圖 6.2.A.1-8 與圖 6.2.A.1-9 所示，且保守地使用 260°C (500°F) 之材料機械性質，此溫度可保守涵蓋密封鋼筒在六.三節中之正常 (32°C)、異常 (41°C) 及極高 (56°C) 環境溫度下之密封鋼筒殼體最高溫度。

(4) 有限元素分析結果之後處理

使用 ANSYS 後處理器求得燃料提籃各部位組件之最大應力，其各部位之提籃組件如燃料方管、彎角支撐鉸件和側邊支撐鉸件，由圖 6.2.A.1-11 至圖 6.2.A.1-16 所示。

透過 ANSYS 指令 PRSECT 求得截面之薄膜應力、薄膜應力加彎曲應力及主要加次要應力。由元素 SOLID45 建構之提籃組件，薄膜應力擷取於組件剖面之中

間位置，薄膜應力加彎曲應力與主要加次要應力則擷取於組件內外表面。由元素 SHELL43 建構之提籃組件，藉由 ANSYS 'mid' 指令選項求得薄膜應力，並藉由 'top' 和 'bot' 指令選項求得最大薄膜應力加彎曲應力。

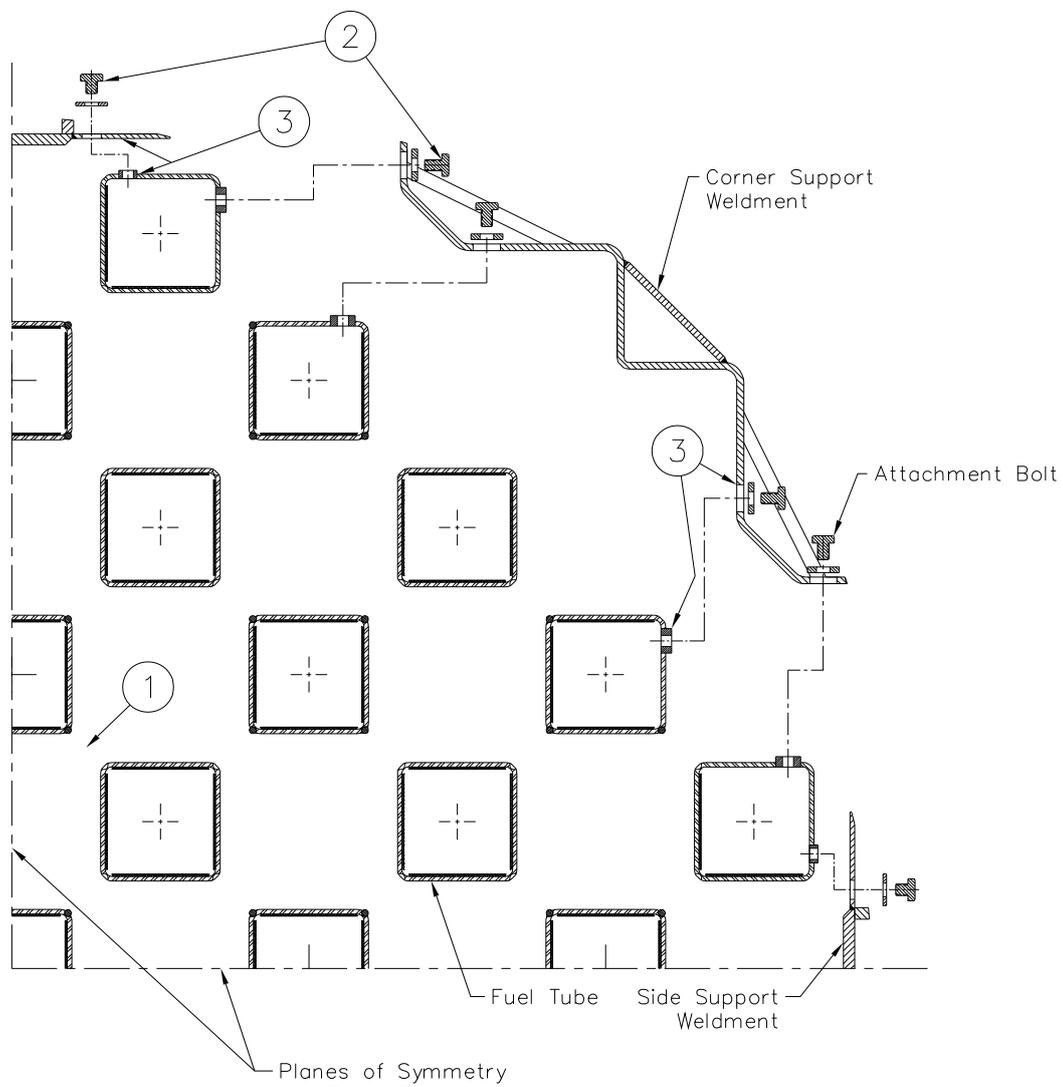


圖 6.2.A.1-1 燃料提籃擴展圖

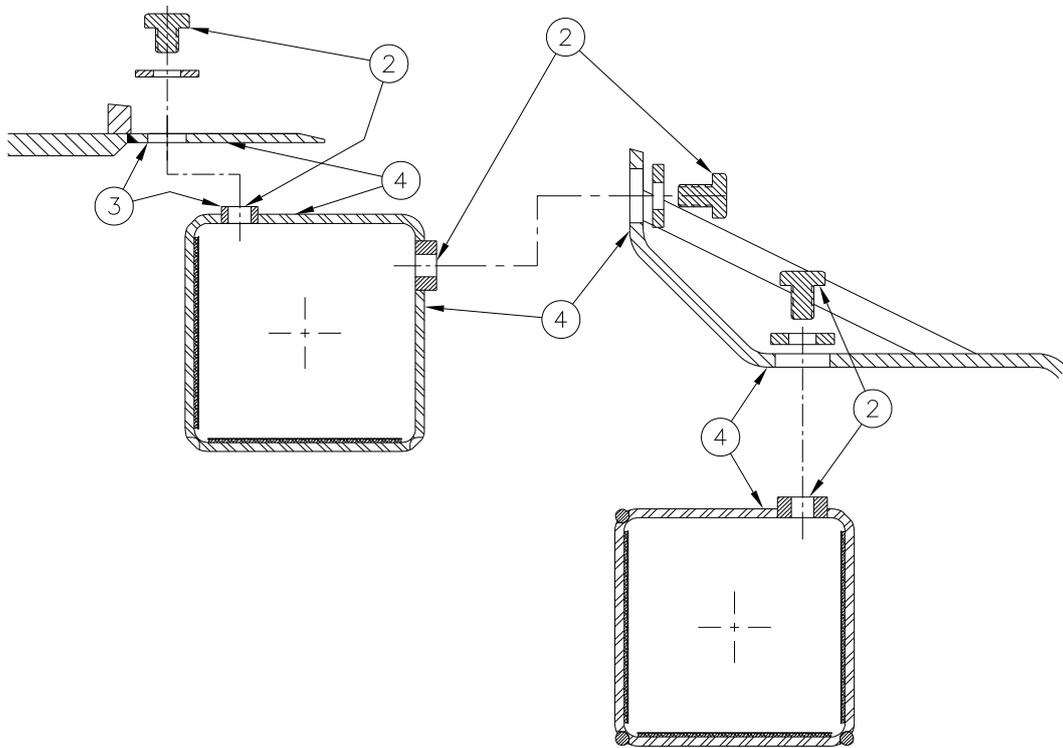


圖 6.2.A.1-2 螺栓固定圖

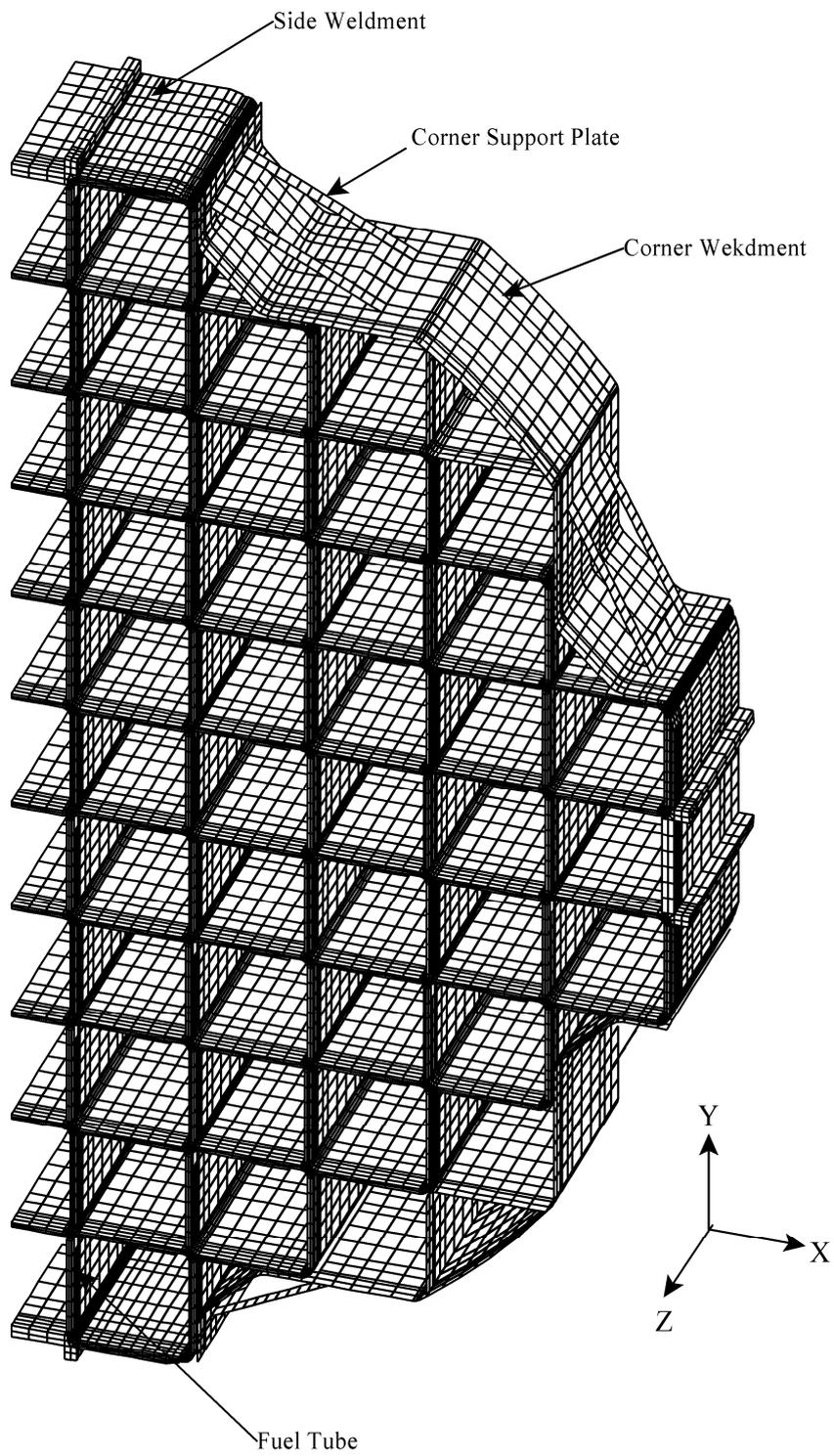


圖 6.2.A.1-3 燃料提籃局部模型-0°提籃角度

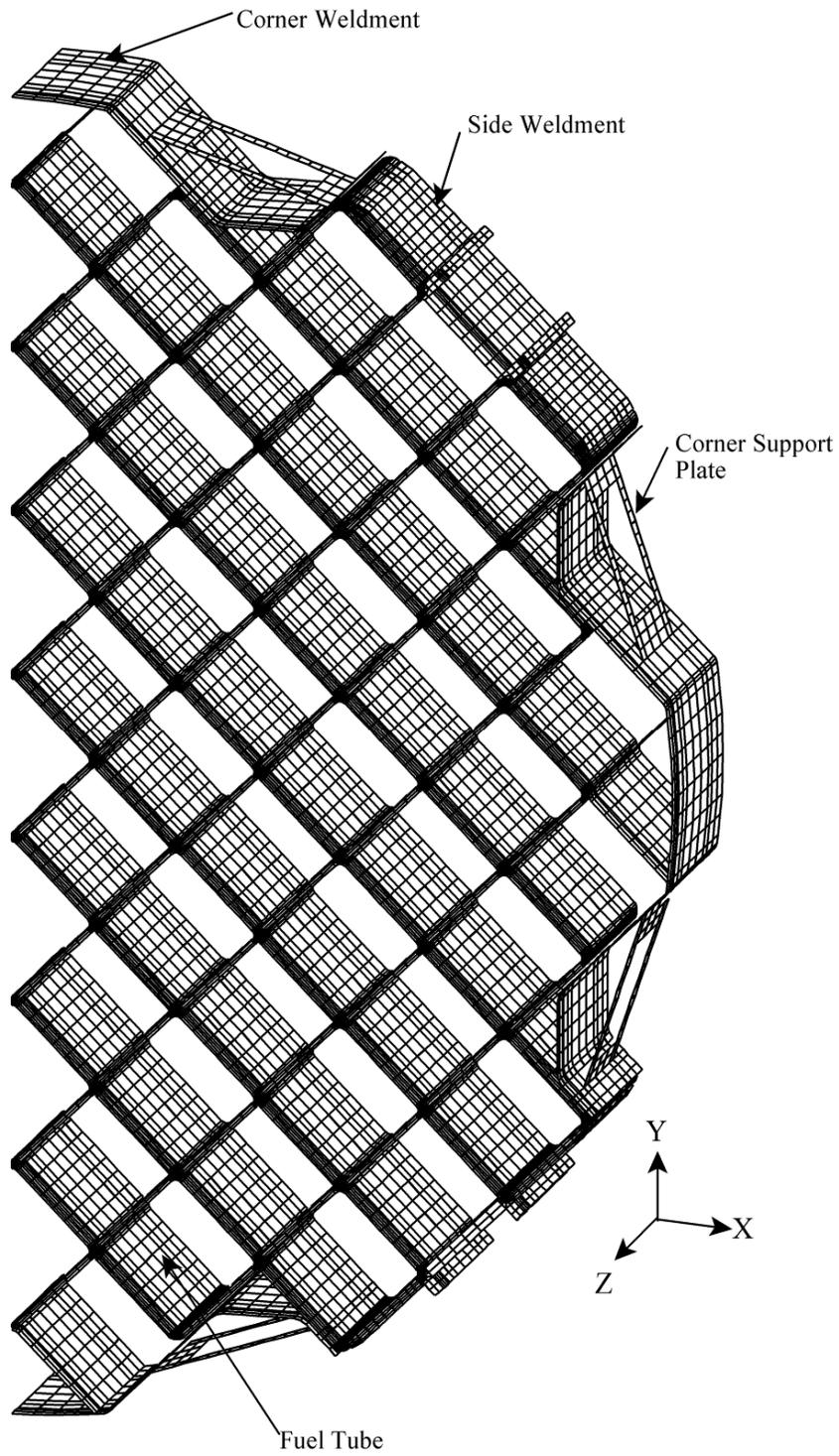


圖 6.2.A.1-4 提籃局部模型-45°提籃角度

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.1-5 定位銷連接有限元素模型(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.1-6 定位銷連接有限元素模型(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.1-7 燃料方管定位銷有限元素模型(NAC Proprietary Information)

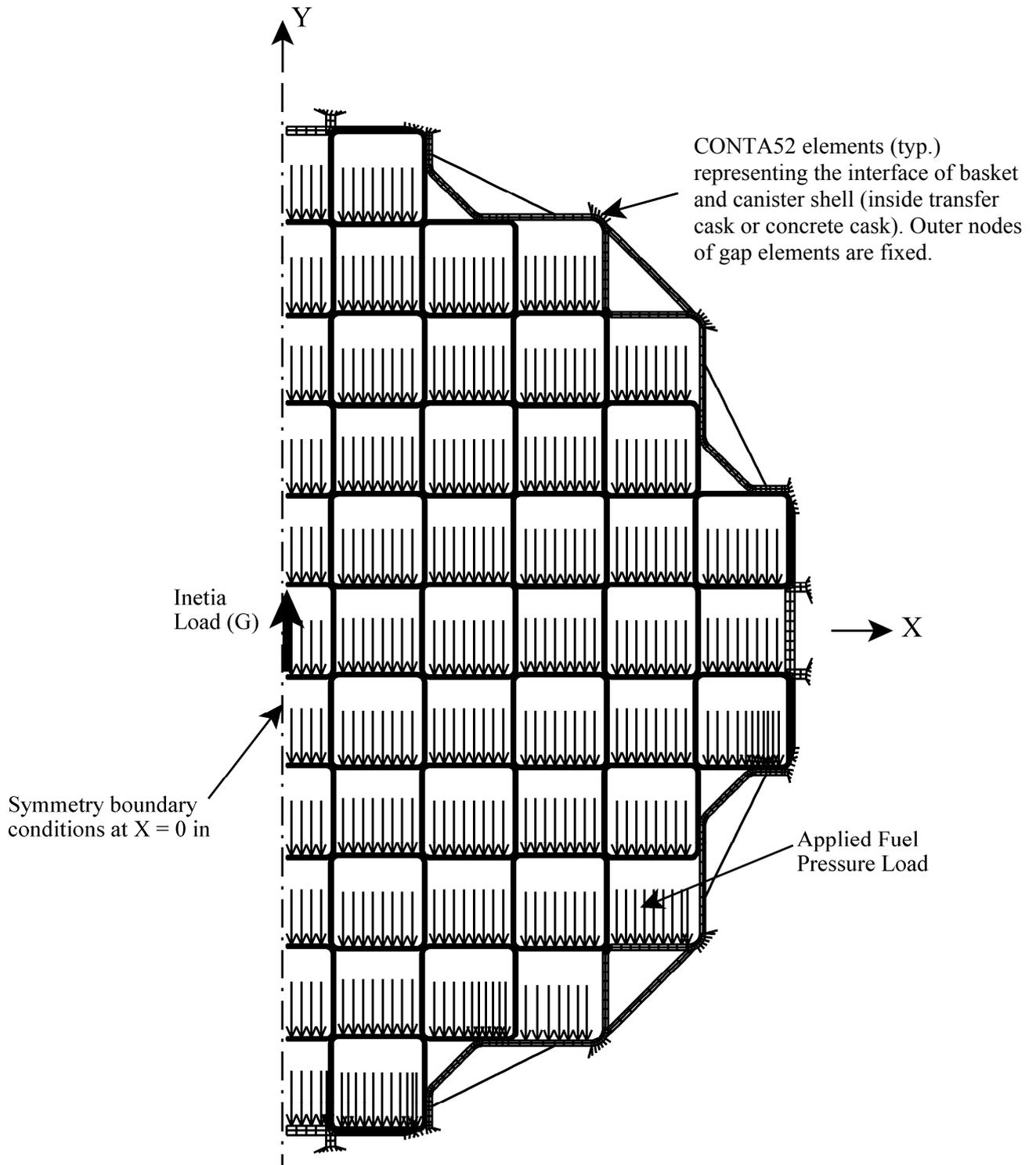


圖 6.2.A.1-8 燃料提籃模型邊界條件-0°提籃角度之徑向負載

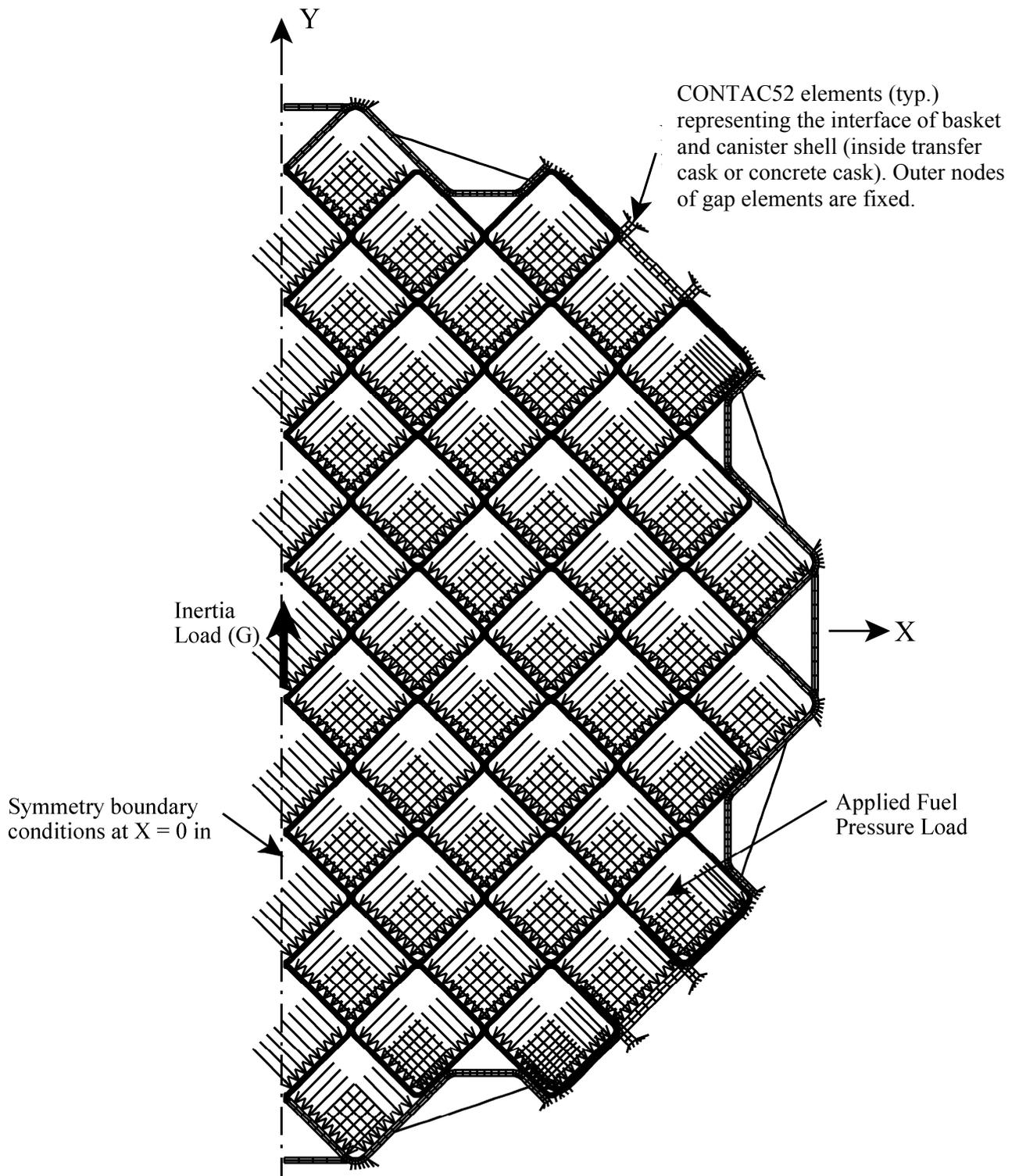


圖 6.2.A.1-9 燃料提籃模型邊界條件-45°提籃角度之徑向負載

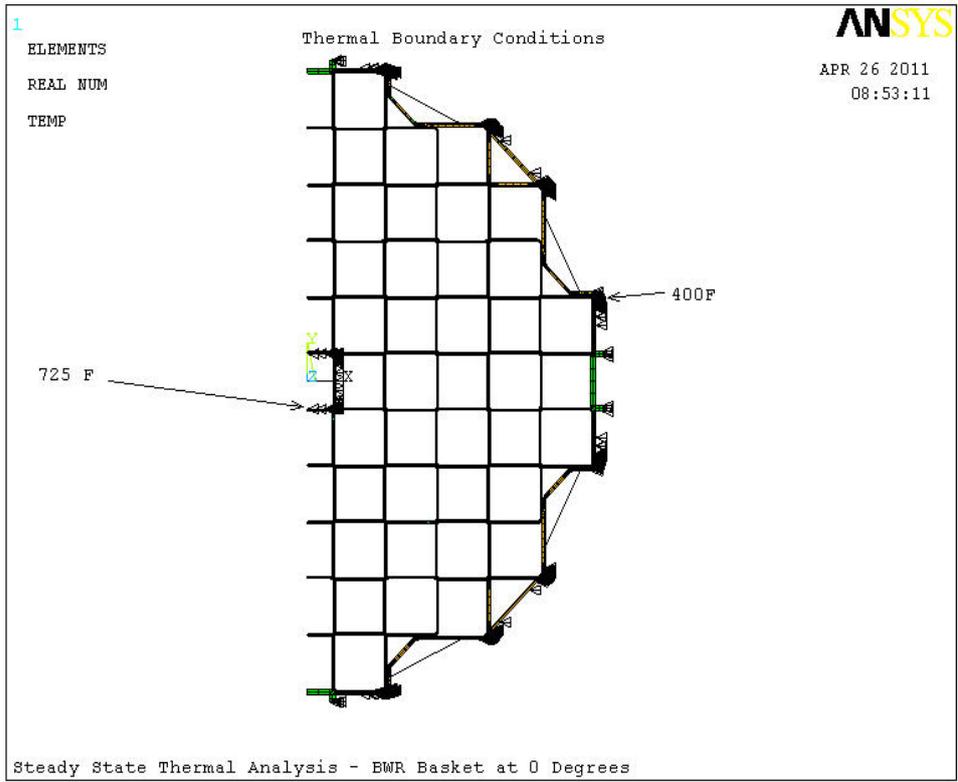


圖 6.2.A.1-10 提籃熱應力邊界條件

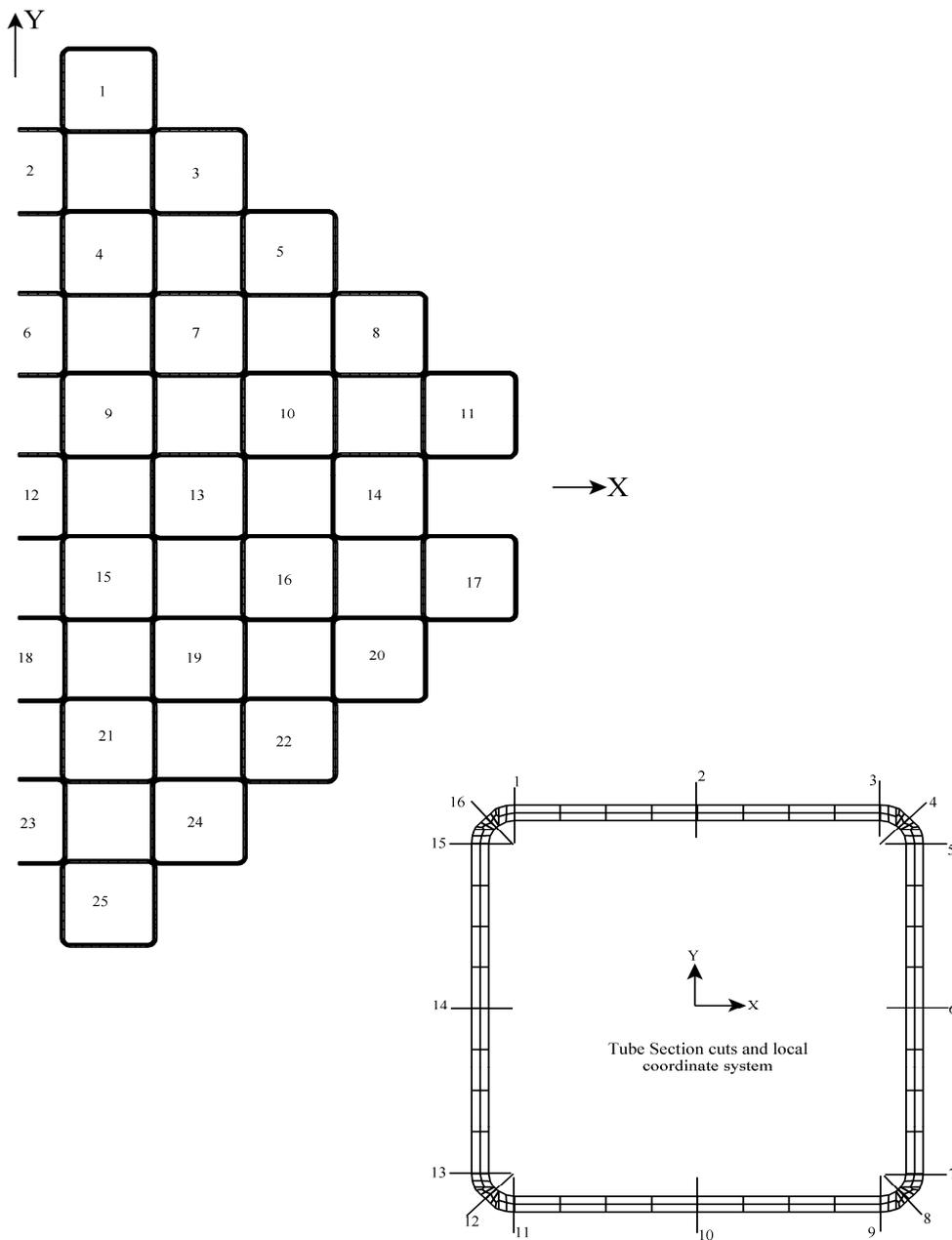


圖 6.2.A.1-11 燃料方管陣列-0°提籃角度

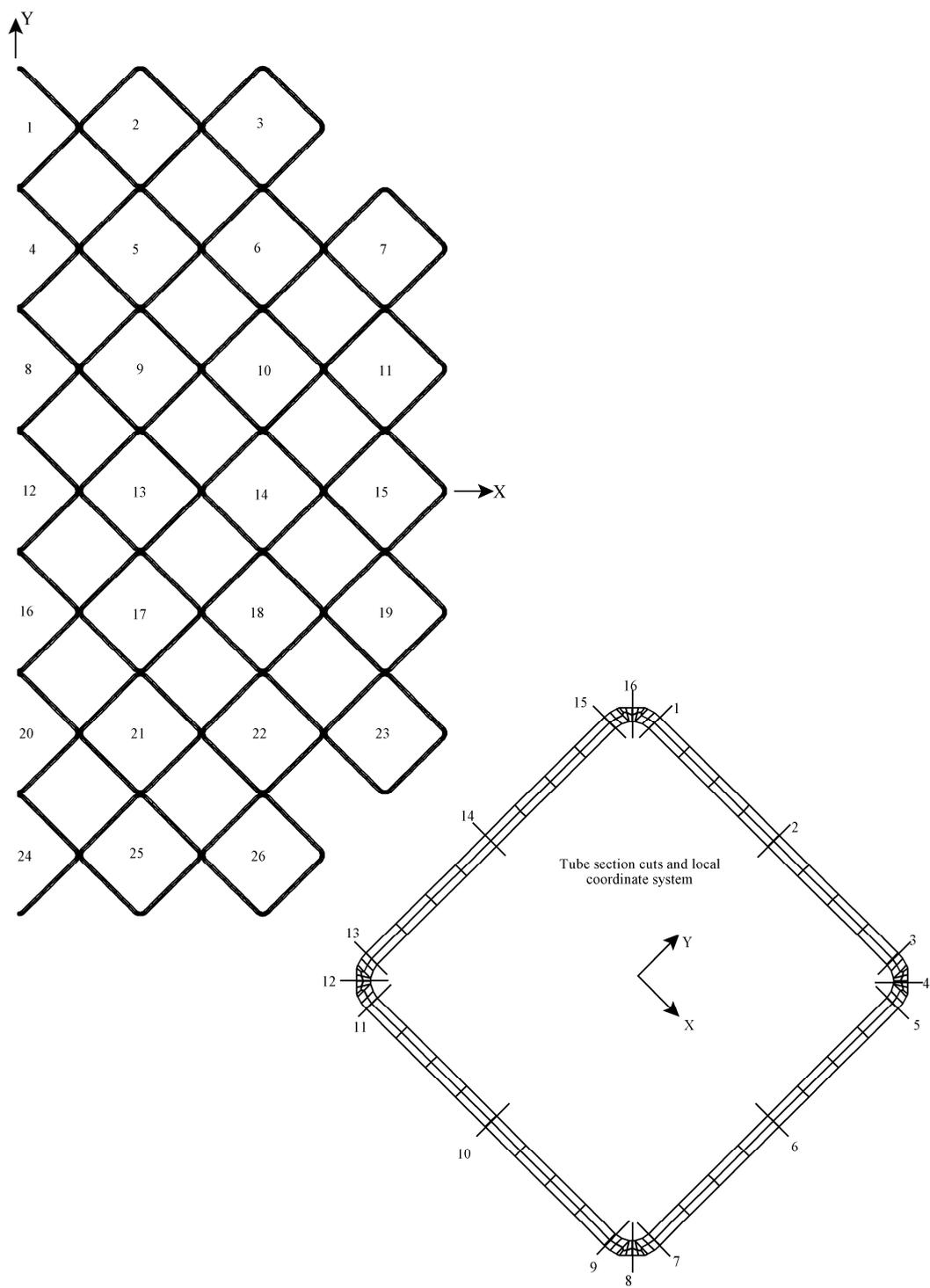


圖 6.2.A.1-12 燃料方管陣列-45°提籃角度

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.1-13 彎角支撐鉸件截面-0°提籃角度(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.1-14 彎角支撐鉸件截面-45°提籃角度(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.1-15 側邊支撐鉸件截面-0°提籃角度(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.1-16 側邊支撐鉸件截面-45°提籃角度(NAC Proprietary Information)

2 密封鋼筒有限元素模型

本節將敘述不同密封鋼筒裝置之有限元素模型，並針對密封鋼筒於吊舉、正常和異常情況或貯存意外事故等狀況進行結構分析。

使用 ANSYS SOLID45 建構單一密封上蓋鋼筒之三維有限元素模型，由於模型幾何對稱關係，因此建構 180° 之模型，其中包括密封鋼筒殼體、底板和密封上蓋，如圖 6.2.A.2-1 所示。密封上蓋與密封鋼筒殼體之間使用 ANSYS CONTAC52 間隙元素(gap element)，同時此元素也用於模擬密封鋼筒在與混凝土護箱內襯或傳送護箱內壁的側向衝擊之計算，並以接觸元件的公稱尺寸建構間隙元素的大小。所有間隙元素勁度皆假設為 1.75×10^7 N/mm (1×10^8 lb/in)。

密封鋼筒吊舉之邊界條件

密封鋼筒吊舉裝置是使用 6 支螺栓，並等角間距的栓在密封上蓋頂部。將密封上蓋上螺栓位置之節點以 Y 方向拘束，以模擬密封鋼筒已吊舉之情況，模型座標系統標示如圖 6.2.A.2-1 所示。吊舉分析中，僅考慮三個吊舉點且又因對稱模型之故，只需要在 60° 和 180° 之吊舉節點以 Y 方向拘束。對稱邊界條件施加於對稱平面上，藉由施加密封鋼筒底部之壓力負載，模擬燃料和提籃重量。於密封鋼筒中心軸方向給於 1.1g 之慣性負載。

正常和異常情況或意外事故之邊界條件

模型拘束

有限元素模型中，對稱平面上所有的節點皆予以 Z 方向拘束，其他負載情況之拘束如下表所示。模型座標系統標示如圖 6.2.A.2-1 所示。

模型拘束整理

狀況	模型拘束
呆載重	Y-方向 – 密封鋼筒底部
正常操作	Y-方向 – 密封鋼筒上蓋吊舉點
異常操作 – 軸向	Y-方向 – 密封鋼筒上蓋吊舉點
異常操作 – 側向	密封鋼筒殼體於半徑方向的間隙元素
傾倒	密封鋼筒殼體於半徑方向的間隙元素
60 g 加速度垂直負載	Y-方向 – 密封鋼筒底部

慣性負載

由密封鋼筒和其內部組件重量所引發之慣性負載乘上適當之因子，而不同情況下之慣性負載如下表所示。

慣性負載整理

狀況	慣性負載
呆載重	1g – 軸向
正常操作	1.1g – 軸向
異常操作	1.5g – 軸向, 0.707g – 側向
傾倒	40g – 側向 (由密封鋼筒之密封上蓋頂部 40g 遞減至混凝土護箱底部 1g)
60 g 加速度垂直負載	60 g – 軸向

壓力負載—內壓力

密封鋼筒內壁、底板與密封上蓋將施加均勻壓力，其中正常情況為 758 kPa (110 psig)、異常情況為 896 kPa(130 psig)、而意外事故情況為 1,724 kPa (250 psig)。

壓力負載—呆載重、操作負載與 60 g 加速度垂直負載

呆載重、正常操作負載與 60 g 加速度垂直負載分析中，密封鋼筒內部組件所引發之慣性負載將均勻的分佈在密封鋼筒底板內側。計算時以 400,320 N (90,000 lb) 的重量來保守涵蓋鋼筒中的內容物之重量(燃料重量 272,431 N (61,248 lb) 及提籃重量 97,856 N (22,000 lb))，密封鋼筒底板半徑為 901.7 mm(35.5 in)，則底板承受壓力計算如下。

$$p = \frac{90,000}{\pi \times 35.5^2} = 0.023 \text{ ksi (0.16 MPa)}$$

此壓力負載將依不同情況乘上不同之慣性負載，如呆載重為 1g、正常操作情況為 1.1g 和 60 g 加速度垂直負載。

壓力負載—異常操作

異常操作情況分析中，同樣由組件重量造成密封鋼筒底板內側之壓力乘上 1.5g，此負載視為軸向組件之壓力負載。對側邊組件而言，組件重量視為等效靜態壓力，藉由 0.707g 施加密封鋼筒殼體之內表面。此壓力除了沿著密封鋼筒腔內長度方向均勻施加，並在環向以餘弦分佈的型式施加，以衝擊中心線為中心之 21°弧線為範圍。

壓力負載—傾倒

由 400,320 N (90,000 lb)組件重量(半對稱模型為 200,337 N (45,000 lb))引起之慣性負載，視為施加在密封鋼筒殼體內表面之等效靜態壓力。此壓力隨著腔內長度方向均勻地遞減，因為慣性負載從密封鋼筒密封上蓋之頂端為 40g 變化至混凝土護箱基座為 1g，並以環向之餘弦分佈的型式施加，其範圍以衝擊中心線為中心之 21°弧線。

熱應力分析之溫度

有限元素熱應力分析中，計算以下三種涵蓋所有密封鋼筒溫度梯度的情況：一為正常貯存情況；二為異常貯存情況；三為運送過程情況。熱應力分析之前，先將密封鋼筒模型的 SOLID45 結構元素轉換為 SOLID70 熱元素，進行熱傳導分析得到貯存與運送狀況下的涵蓋性的溫度數據，以決定熱應力分析時的穩態溫度分佈。在熱分析中，在幾個特定節點給予溫度條件：如密封上蓋頂部中心點、密封上蓋頂部外徑、密封上蓋組件底部中心點、底板底部中心點、底板底部外徑、和密封鋼筒殼體最高溫度的地方。

貯存和運送情況造成密封鋼筒組件之溫度分佈，溫度邊界條件如下所示，其溫度點位置定義由 A 至 F，如圖 6.2.A.2-2 所示，藉由穩態熱傳分析計算出密封鋼筒模型內所有節點之溫度。

密封上蓋頂部中心點 (C) = 266 °C (510°F)

密封上蓋頂部外徑(F) = 211 °C (430°F)

密封上蓋組件底部中心點(B) = 299 °C (570°F)

底板底部中心點(A) = 177 °C (350°F)

底板底部外徑(D) = 116 °C (240°F)

密封鋼筒底部往上 4,216 mm (166 in)之密封鋼筒殼(E) = 266 °C (510°F)

後處理

依據 ASME code, Section III, Subsection NB 進行密封鋼筒應力評估，比較某斷面之線性化截面應力與容許應力。將模型以每 3 度作一切割，共切 15 個斷面，如圖 6.2.A.2-2 所示。並由 Subsection NB 中可查得密封鋼筒在正常、異常與意外狀況下的容許應力值。

以貯存和運送過程中，密封鋼筒組件的最大溫度作為涵蓋溫度來採計容許應力值。每一斷面之溫度如圖 6.2.A.2-2 所示，使用 SA-240 Type 304 不銹鋼材料之機械性質，所有應力分量表示成總體圓柱座標系統(X 為徑向、Y 為環向、Z 為軸向)。此外，根據 ISG 15, Revision 0 使用 0.8 之鐸道折減因子採計密封蓋鐸道之容許應力值，鐸道如圖 6.2.A.2-2 之斷面 '11' 。

密封鋼筒分析結果

密封鋼筒於正常、異常和意外事故情況下之分析結果如表 6.2.A.2-1 至表 6.2.A.2-17 所示，其各斷面位置如圖 6.2.A.2-2 所示。

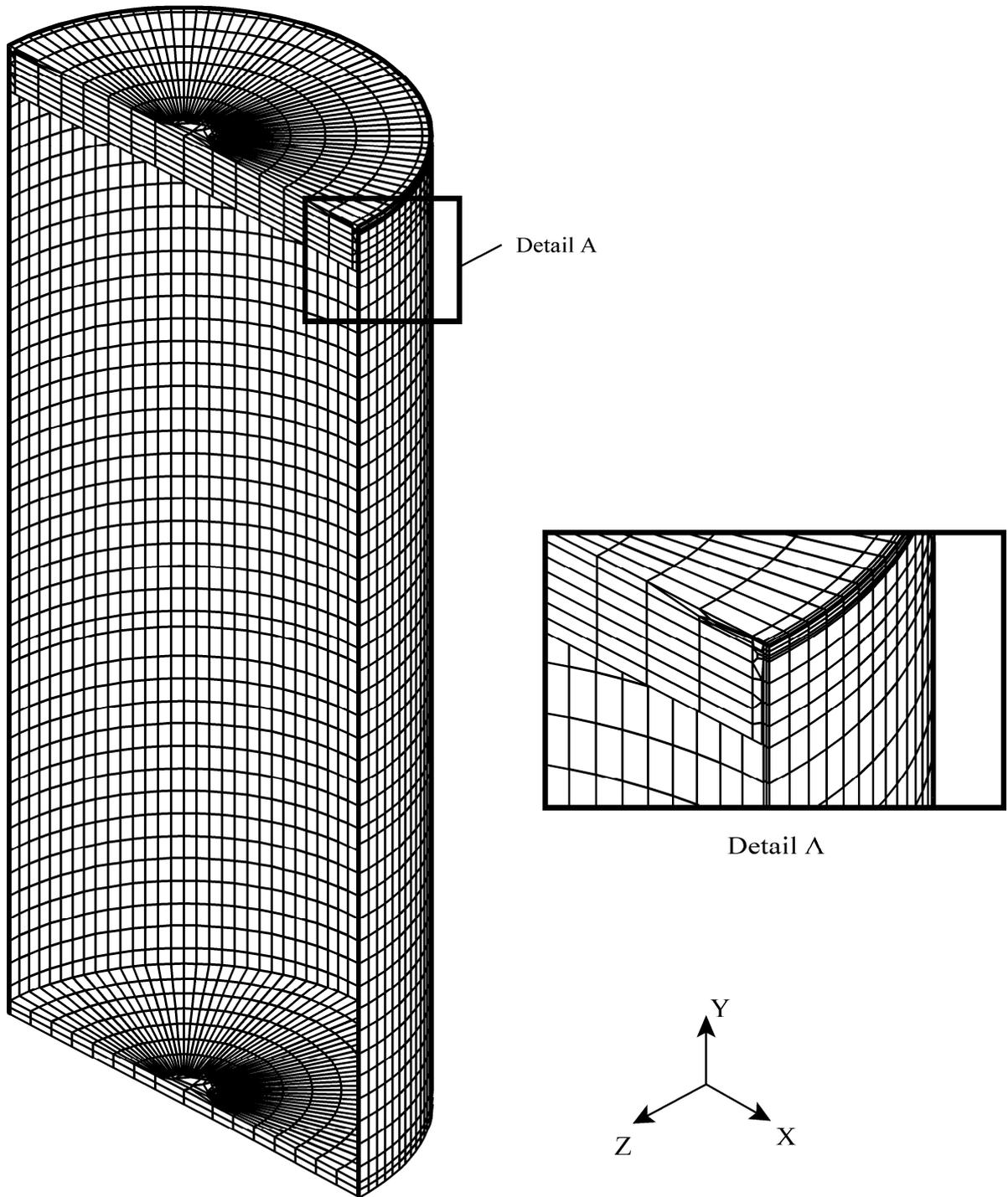


圖 6.2.A.2-1 密封鋼筒有限元素模型

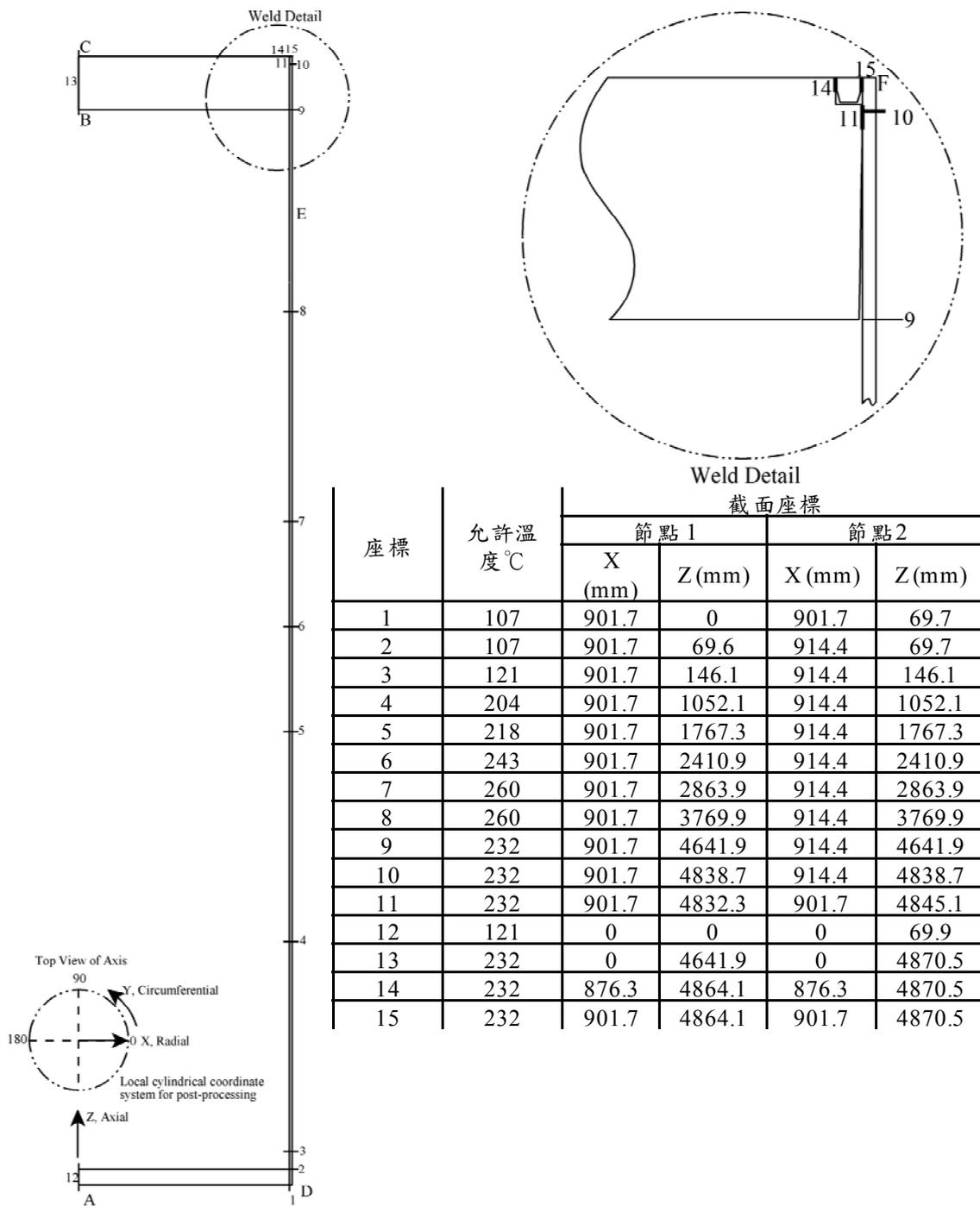


圖 6.2.A.2-2 密封鋼筒分析應力線性化之截面

表 6.2.A.2-1 密封鋼筒正常壓力加操作, P_m , MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	-0.83	11.04	30.08	-0.28	0.35	-1.24	31.05	138.00	4.44
2	6.35	-62.51	-8.90	-1.52	0.07	-4.55	70.17	138.00	1.97
3	-4.00	-65.48	33.33	-1.31	-0.21	6.97	100.12	138.00	1.38
4	-0.14	53.89	32.98	-1.45	0.00	0.00	54.10	129.03	2.39
5	-0.28	53.89	32.98	-1.38	0.00	0.00	54.23	126.96	2.34
6	-0.28	53.89	32.91	-1.45	0.00	0.00	54.23	123.23	2.27
7	-0.35	53.89	32.84	-1.45	0.00	0.00	54.23	120.75	2.23
8	-0.35	53.82	32.71	-1.45	0.00	0.00	54.23	120.75	2.23
9	-0.48	53.13	32.57	-1.38	0.00	0.21	53.68	124.89	2.33
10	-2.42	8.69	7.45	0.00	0.00	0.48	11.18	124.89	11.17
11	-0.62	7.94	2.62	-0.07	0.00	-5.87	13.04	99.91 ^b	7.66
12	1.73	2.00	-4.49	0.00	8.69	-9.73	26.91	138.00	5.13
13	0.21	0.21	-0.41	0.00	-0.35	0.35	1.17	124.89	106.74
14	3.38	10.97	-0.28	0.14	-0.35	-0.90	11.52	124.89	10.84
15	1.24	10.42	0.55	0.00	0.00	-0.69	10.35	124.89	12.07

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b容許應力值已納入密封上蓋銲道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-2 密封鋼筒正常壓力加操作, $P_m + P_b$, MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	-6.62	-40.16	79.42	-0.62	-0.14	-1.73	119.58	207.00	1.73
2	19.60	-97.70	-8.90 ^b	0.00	0.00	-8.21	119.51	207.00	1.73
3	-1.73	-34.09	134.21	-0.55	-0.28	8.76	168.91	207.00	1.23
4	-0.35	54.65	33.26	-1.45	0.00	0.07	55.06	193.55	3.52
5	-0.41	54.79	33.19	-1.45	0.00	-0.14	55.34	190.44	3.44
6	-0.48	54.86	33.19	-1.45	0.00	0.00	55.41	184.85	3.34
7	-0.48	54.92	33.12	-1.45	0.00	0.00	55.48	181.13	3.26
8	-0.55	54.79	32.98	-1.45	0.00	0.00	55.41	181.13	3.27
9	-0.35	56.03	43.61	-1.45	0.00	0.07	56.44	187.34	3.32
10	-5.38	7.80	7.66	0.00	0.00	6.14	17.94	187.34	10.44
11	-0.97	10.63	14.15	0.00	0.00	-8.14	22.29	149.87 ^c	6.72
12	170.15	162.29	20.42	5.18	7.38	-9.80	153.59	207.00	1.35
13	19.80	19.67	0.28	0.00	-0.41	0.28	19.46	187.34	9.63
14	4.21	11.45	-0.48	0.28	-0.62	-0.83	12.21	187.34	15.34
15	-4.07	8.63	-1.04	0.00	0.35	0.41	12.77	187.34	14.67

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b局部彎曲應力為次要應力，不列入本項評估。

^c容許應力值已納入密封上蓋鐸道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-3 密封鋼筒正常壓力加操作, P + Q, MPa

截面 ^a	應力分量						S _{int}	S _{allow}	FS
	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}			
1	4.69	87.70	-18.84	-0.14	-0.07	-0.35	106.54	414.00	3.89
2	19.46	-77.14	-135.31	0.00	0.00	-8.21	155.66	414.00	2.66
3	-2.00	-24.84	137.66	0.00	0.28	8.42	163.05	414.00	2.54
4	-0.41	56.44	33.40	-1.45	0.07	0.07	56.93	387.09	6.80
5	-0.48	57.20	33.40	-1.45	0.00	-0.14	57.75	380.88	6.59
6	-0.55	57.48	33.26	-1.45	0.00	0.00	58.10	369.70	6.36
7	-0.55	57.75	33.40	-1.52	0.00	0.00	58.37	362.25	6.21
8	-0.55	57.27	33.40	-1.45	0.00	0.00	57.89	362.25	6.26
9	-0.48	54.65	43.40	0.00	0.00	0.00	55.13	374.67	6.80
10	-6.14	17.32	2.69	0.00	-0.07	7.80	28.01	374.67	13.38
11	-1.66	16.15	-10.49	0.28	0.07	-3.80	28.01	299.74 ^b	10.70
12	-283.18	-261.51	-58.31	-8.63	-1.04	-10.42	228.87	414.00	1.81
13	-94.19	-83.70	-26.08	-1.79	4.42	1.93	68.93	374.67	5.44
14	0.41	20.91	-2.76	0.00	0.00	-0.69	23.81	374.67	15.74
15	-7.80	24.63	-0.90	0.62	-0.07	-0.14	32.43	374.67	11.55

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b容許應力值已納入密封上蓋銲道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-4 密封鋼筒正常壓力, P_m , MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}	
1	-0.69	9.18	24.91	-0.21	0.28	-1.17	25.74
2	5.45	-49.82	-8.00	1.24	-0.07	-3.80	56.37
3	-3.45	-47.82	26.98	0.90	0.14	5.87	75.97
4	-0.21	53.89	26.63	-1.45	0.00	0.00	54.10
5	-0.28	53.89	26.57	-1.45	0.00	0.00	54.23
6	-0.28	53.89	26.57	-1.45	0.00	0.00	54.23
7	-0.35	53.82	26.57	-1.45	0.00	0.00	54.23
8	-0.35	53.82	26.57	-1.45	0.00	0.00	54.23
9	-0.41	53.34	26.57	-1.38	0.00	0.28	53.89
10	-2.76	5.31	4.07	-0.21	0.07	1.86	8.56
11	-0.76	6.56	5.73	-0.21	-0.07	-4.14	10.56
12	1.31	1.59	-4.35	0.00	6.76	-7.80	21.46
13	0.28	0.28	-0.41	0.00	-0.28	0.28	1.04
14	2.14	7.31	-0.62	-0.14	0.00	-0.48	8.00
15	0.62	7.18	1.10	-0.14	-0.07	-0.28	6.69

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

表 6.2.A.2-5 密封鋼筒正常壓力, $P_m + P_b$, MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}	
1	-5.18	-31.19	65.62	0.48	0.14	-1.52	96.81
2	16.35	-79.14	-115.30	0.00	0.00	-6.83	132.41
3	-1.38	-22.29	108.88	0.28	0.21	7.38	131.65
4	-0.41	54.51	26.84	-1.45	0.00	0.07	54.92
5	-0.48	54.51	26.70	-1.45	0.00	-0.14	55.06
6	-0.48	54.51	26.70	-1.45	0.00	0.00	55.06
7	-0.48	54.51	26.70	-1.45	0.00	0.00	55.06
8	-0.55	54.44	26.70	-1.45	0.00	0.00	55.06
9	-0.35	56.51	38.16	0.00	0.00	0.07	56.86
10	-5.18	2.55	-2.28	-0.21	0.14	7.04	14.35
11	0.48	9.66	15.87	-0.28	-0.07	-6.21	19.80
12	135.52	129.10	14.84	4.07	5.45	-7.87	123.58
13	15.46	15.32	0.21	0.00	-0.28	0.28	15.25
14	2.97	7.87	-0.55	-0.14	0.14	-0.35	8.42
15	-3.17	5.80	-0.41	-0.21	-0.07	0.14	8.97

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

表 6.2.A.2-6 密封鋼筒熱應力, Q, MPa

截面 ^a	應力分量						S _{int}
	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}	
1	-0.35	25.67	0.35	0.00	0.00	0.28	26.15
2	-1.38	19.46	-1.73	-0.55	0.00	-0.07	21.25
3	0.62	7.31	-3.52	0.00	-0.07	-0.21	10.83
4	0.00	-1.86	-1.04	0.07	0.00	0.00	1.86
5	0.00	-2.48	-1.38	0.14	0.00	0.00	2.48
6	0.00	-2.90	-1.45	0.14	0.00	0.00	2.90
7	0.00	-2.97	-1.59	0.14	0.00	0.00	2.97
8	-0.07	-3.04	-1.38	0.14	0.00	0.00	2.97
9	-0.14	-3.93	-1.38	0.21	0.00	-0.07	3.80
10	-0.83	9.45	-5.11	0.00	-0.07	1.66	15.18
11	-2.28	11.25	0.07	0.07	0.00	0.48	13.66
12	-116.40	-103.16	-28.98	-3.45	-11.04	-0.69	90.05
13	-74.87	-64.52	-24.98	-1.79	4.76	1.52	50.92
14	-1.73	11.04	-0.48	0.00	0.00	0.07	12.83
15	-3.38	16.49	1.17	-0.35	0.07	0.14	19.87

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

表 6.2.A.2-7 密封鋼筒異常壓力加操作, P_m , MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	-0.97	12.70	34.64	-0.35	0.41	-1.45	35.74	151.80	4.25
2	7.38	-71.55	-10.42	-1.79	0.07	-5.24	80.45	151.80	1.89
3	-4.62	-74.18	38.23	-1.45	-0.21	8.00	113.92	151.80	1.33
4	-0.21	63.69	37.81	-1.66	0.00	0.00	63.96	141.93	2.22
5	-0.28	63.69	37.81	-1.66	0.00	0.00	64.03	139.66	2.18
6	-0.35	63.69	37.74	-1.66	0.00	0.00	64.10	135.59	2.11
7	-0.35	63.69	37.67	-1.66	0.00	0.00	64.10	132.83	2.07
8	-0.41	63.62	37.54	-1.66	0.00	0.00	64.10	132.83	2.07
9	-0.55	62.86	37.40	-1.66	0.00	0.28	63.48	137.38	2.16
10	-2.90	9.73	8.28	0.00	0.00	0.76	12.70	137.38	10.82
11	-0.76	9.11	3.66	-0.07	0.00	-6.62	14.70	109.92 ^b	7.48
12	1.93	2.28	-5.24	0.00	9.94	-11.18	30.84	151.80	4.92
13	0.28	0.28	-0.48	0.00	-0.41	0.41	1.38	137.38	99.55
14	3.73	12.35	-0.41	0.14	-0.35	-0.97	12.97	137.38	10.59
15	1.38	11.73	0.76	0.00	0.00	-0.76	11.52	137.38	11.93

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b容許應力值已納入密封上蓋銲道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-8 密封鋼筒異常壓力加操作, $P_m + P_b$, MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	-7.59	-45.82	91.29	-0.69	-0.21	-1.93	137.17	227.70	1.66
2	22.56	-112.06	-158.84	0.00	0.00	-9.45	182.44	414.00 ^b	2.27
2	22.56	-112.06	-10.42 ^c	0.00	0.00	-9.45	137.10	227.70	1.66
3	-1.93	-38.16	153.94	0.00	0.00	10.14	192.79	227.70	1.18
4	-0.41	64.58	38.09	-1.73	0.00	0.07	65.07	212.93	3.27
5	-0.48	64.72	38.02	-1.73	0.00	-0.21	65.34	209.48	3.21
6	-0.55	64.79	38.02	-1.73	0.00	0.00	65.48	203.34	3.11
7	-0.62	64.79	37.95	-1.73	0.00	0.00	65.48	199.27	3.04
8	-0.62	64.72	37.81	-1.73	0.00	0.00	65.41	199.27	3.05
9	-0.41	66.38	50.65	0.00	0.07	0.07	66.79	206.10	3.09
10	-6.35	8.21	7.25	0.00	0.00	7.45	20.15	206.10	10.23
11	-0.90	12.35	17.04	0.00	0.00	-9.32	25.88	164.84 ^d	6.37
12	194.79	185.82	23.12	5.93	8.42	-11.18	176.09	227.70	1.29
13	22.56	22.43	0.35	0.00	-0.41	0.35	22.29	206.10	9.25
14	4.69	12.90	-0.62	0.28	-0.62	-0.90	13.73	206.10	15.01
15	-4.62	9.73	-1.10	0.00	0.35	0.48	14.42	206.10	14.29

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b彎曲應力為次要應力，使用 P+Q。

^c局部彎曲應力為次要應力，不列入本項評估。

^d容許應力值已納入密封上蓋銲道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-9 密封鋼筒異常壓力加操作, P + Q, MPa

截面 ^a	應力分量						S _{int}	S _{allow}	FS
	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}			
1	5.38	96.67	-21.74	-0.14	-0.07	-0.48	118.40	414.00	3.50
2	22.49	-91.49	-156.22	0.00	0.00	-9.45	179.68	414.00	2.30
3	-2.21	-28.91	157.39	0.00	0.28	9.73	186.92	414.00	2.21
4	-0.48	66.31	38.30	-1.73	0.07	0.07	66.86	380.88	5.62
5	-0.55	67.07	38.30	-1.73	0.00	-0.14	67.76	369.70	5.43
6	-0.62	67.41	38.16	-1.73	0.00	0.00	68.10	369.70	5.43
7	-0.62	67.62	38.23	-1.73	0.00	0.00	68.38	362.25	5.30
8	-0.62	67.21	38.30	-1.73	0.00	0.00	67.97	362.25	5.33
9	-0.55	64.93	50.37	0.00	-0.07	0.00	65.48	374.67	5.72
10	-7.11	17.80	2.21	0.00	-0.07	9.04	30.43	374.67	12.31
11	-2.00	16.77	-11.32	0.28	0.07	-4.21	29.67	299.74 ^b	10.10
12	-307.33	-284.42	-62.58	-9.38	0.41	-11.80	249.23	414.00	1.66
13	-96.95	-86.46	-26.22	-1.79	4.35	2.00	71.48	374.67	5.24
14	2.97	24.01	-1.10	0.28	-0.62	-0.90	25.25	374.67	14.84
15	-8.35	25.67	-0.97	0.69	-0.07	-0.07	34.09	374.67	10.99

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b容許應力值已納入密封上蓋銲道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-10 密封鋼筒正常壓力加異常操作, P_m , MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	-11.32	8.28	31.33	1.38	0.28	-2.42	42.99	170.78	3.97
2	8.28	-70.04	-7.38	1.79	-0.97	-4.83	79.83	170.78	2.14
3	-4.14	-72.93	37.40	0.07	-0.69	7.31	111.57	169.05	1.52
4	-0.83	54.79	38.85	0.55	0.00	0.00	55.61	155.25	2.79
5	-0.83	54.44	38.85	0.48	0.00	0.00	55.20	152.63	2.77
6	-0.83	54.37	38.57	0.41	0.00	0.00	55.20	148.01	2.68
7	-0.90	54.37	38.43	0.48	0.00	0.00	55.27	144.90	2.62
8	-1.04	54.86	37.61	0.62	0.07	0.00	55.82	144.90	2.60
9	-0.55	54.58	33.81	0.21	-0.55	0.21	55.06	150.08	2.73
10	-42.37	-0.76	6.14	4.55	-1.24	-4.42	50.16	150.08	2.99
11	-34.09	2.07	-2.35	5.18	-1.52	-9.94	42.09	120.06 ^b	2.85
12	1.66	2.21	-4.49	0.00	9.45	-10.42	28.84	169.05	5.86
13	0.14	0.28	-0.41	0.00	-0.41	0.35	1.17	150.08	128.27
14	-10.90	9.32	-1.45	3.24	0.21	0.48	21.25	150.08	7.06
15	-25.25	6.42	-1.38	4.62	-1.93	-1.86	33.60	150.08	4.47

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b容許應力值已納入密封上蓋銲道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-11 密封鋼筒正常壓力加異常操作, $P_m + P_b$, MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	-7.18	-46.23	85.84	2.42	0.69	-2.00	132.27	244.26	1.85
2	21.60	-108.47	-7.38 ^b	-0.35	-1.31	-8.90	132.69	244.26	1.84
3	-1.59	-42.57	146.56	-0.97	0.35	9.32	189.68	240.12	1.27
4	-0.97	88.39	49.27	-2.42	0.14	0.07	89.42	214.59	2.40
5	-0.90	89.08	49.54	-2.48	0.00	-0.14	90.11	211.14	2.34
6	-0.90	88.80	49.27	-2.48	0.00	0.00	89.84	204.93	2.28
7	-0.97	89.15	49.20	-2.48	0.00	0.00	90.18	200.79	2.23
8	-1.17	87.98	47.89	-2.42	-0.07	0.00	89.29	200.79	2.25
9	-2.00	67.34	28.70	-1.66	-1.10	0.41	69.41	207.69	2.99
10	-51.27	-7.18	8.07	4.07	-1.24	1.45	59.89	207.69	3.47
11	-38.50	1.66	5.52	4.55	-1.24	-10.42	49.82	166.15 ^c	3.34
12	182.23	174.92	22.43	5.52	8.14	-10.42	164.15	240.12	1.46
13	20.36	22.01	0.35	0.00	-0.41	0.21	21.67	207.69	9.59
14	-9.52	11.25	-0.97	3.59	0.14	0.90	22.08	207.69	9.41
15	-23.94	8.21	-0.83	5.04	-1.38	-2.42	34.16	207.69	6.08

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b局部彎曲應力為次要應力，不列入本項評估。

^c容許應力值已納入密封上蓋銲道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-12 密封鋼筒意外壓力加自重, P_m , MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	-1.59	20.77	56.24	-0.55	0.62	-2.55	58.10	328.30	5.65
2	12.49	-113.51	-19.04	2.76	-0.07	-8.69	128.41	328.30	2.56
3	-7.80	-108.95	60.31	2.00	0.41	13.32	171.81	325.34	1.89
4	-0.41	122.41	59.55	-3.24	0.00	0.00	123.03	309.12	2.51
5	-0.62	122.41	59.55	-3.24	0.00	0.00	123.17	304.29	2.47
6	-0.69	122.41	59.55	-3.24	0.00	0.00	123.23	295.60	2.40
7	-0.76	122.41	59.62	-3.24	0.00	0.00	123.30	289.80	2.35
8	-0.76	122.34	59.62	-3.24	0.00	0.00	123.30	289.80	2.35
9	-1.04	121.30	59.75	-3.17	0.00	0.55	122.48	299.46	2.45
10	-6.28	11.94	8.90	-0.48	0.14	4.35	19.39	299.46	15.44
11	-1.79	14.90	13.25	-0.48	-0.14	-9.32	23.94	239.57 ^b	10.01
12	2.97	3.59	-9.94	-0.07	15.39	-17.73	48.78	325.34	6.67
13	0.55	0.55	-0.90	0.00	-0.69	0.69	2.42	299.46	123.74
14	4.76	16.49	-1.38	-0.35	0.07	-1.17	18.08	299.46	16.56
15	1.31	16.22	2.48	-0.41	-0.14	-0.62	15.11	299.46	19.82

^a 截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b 容許應力值已納入密封上蓋鉸道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-13 密封鋼筒意外壓力加自重, $P_m + P_b$, MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	-12.01	-71.00	148.56	1.04	0.28	-3.45	219.70	481.62	2.19
2	37.33	-180.23	-19.04 ^b	0.00	0.00	-15.59	221.63	481.62	2.17
3	-3.17	-50.72	246.47	0.62	0.48	16.77	298.36	473.34	1.59
4	-0.90	123.86	60.03	-3.24	0.00	0.14	124.89	441.60	3.54
5	-1.04	123.92	59.89	-3.24	0.00	-0.28	125.10	439.88	3.52
6	-1.10	123.86	59.89	-3.24	0.00	0.00	125.17	436.77	3.49
7	-1.17	123.86	59.89	-3.24	0.00	0.00	125.24	434.70	3.47
8	-1.24	123.79	59.96	-3.24	0.00	0.00	125.17	434.70	3.47
9	-0.69	128.48	86.11	0.00	0.00	0.21	129.24	438.15	3.39
11	1.17	22.01	36.23	-0.55	-0.21	-13.94	44.78	350.52 ^c	7.83
10	-11.73	5.31	-6.42	0.00	0.00	16.08	32.64	438.15	13.42
12	307.74	293.39	33.67	9.32	12.42	-17.80	280.83	473.34	1.69
13	34.78	34.50	0.48	0.07	-0.69	0.69	34.36	438.15	12.75
14	6.56	17.60	-1.31	-0.35	0.21	-0.83	18.98	438.15	23.08
15	-7.11	13.11	-0.83	-0.48	-0.14	0.35	20.22	438.15	21.67

^a 截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b 局部彎曲應力為次要應力，不列入本項評估。

^c 容許應力值已納入密封上蓋銲道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-14 密封鋼筒傾倒加正常壓力, P_m , MPa

截面 ^a	角度	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
		S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	69	-1.10	10.90	26.98	0.90	2.00	-2.42	28.77	328.30	11.41
2	69	7.73	-59.20	-17.25	1.10	5.45	-4.97	68.66	328.30	4.78
3	69	-3.80	-60.44	20.70	-0.28	8.42	6.49	84.39	325.34	3.86
4	27	-0.21	61.62	1.79	0.07	22.49	0.00	74.80	309.12	4.13
5	0	-33.26	-83.15	-75.42	86.80	2.28	7.94	181.26	304.29	2.57
6	0	-2.69	59.34	-37.19	-0.69	-1.66	0.41	96.67	295.60	3.06
7	0	-2.21	69.35	-11.32	-0.14	-1.04	0.00	80.66	289.80	3.59
8	0	-3.59	56.65	12.49	1.86	-0.41	0.00	60.38	289.80	4.80
9	33	-8.90	113.71	15.25	9.18	-8.42	1.10	124.82	299.46	2.40
10 ^b	6	-37.88	46.78	-6.28	-16.56	-13.87	-12.56	98.88	299.46	3.03
11 ^c	0 - 6	-164.84	-117.92	-131.45	74.31	-12.21	-61.55	200.45	239.57 ^c	1.20
12	0	1.24	1.59	-3.86	0.00	6.00	-7.18	19.46	325.34	16.72
13	0	-9.38	-1.59	-3.93	0.83	-0.07	-23.46	47.33	299.46	6.33
14 ^b	6	13.11	-61.27	0.00	35.88	27.60	-14.42	114.89	299.46	2.61
15 ^b	6	0.90	-41.47	-15.80	-2.90	-5.38	0.62	43.88	299.46	6.83

^a 截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b 意外事故狀態不需考慮承壓應力。

^c 應力為撞擊區域的平均應力值。容許應力值已納入密封上蓋鉸道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-15 密封鋼筒傾倒加正常壓力, P_m+P_b , MPa

截面 ^a	角度	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
		S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	69	-3.73	-36.43	72.24	1.04	3.52	-3.04	109.09	481.62	4.41
2	66	19.11	-94.25	-17.25 ^b	0.48	5.38	-8.07	115.51	481.62	4.17
3	66	-1.17	-33.81	116.89	-0.41	9.18	8.14	152.42	473.34	3.11
4	27	-0.48	134.83	26.50	0.07	28.64	0.07	142.42	441.60	3.10
5	60	4.69	412.07	288.28	0.14	5.59	1.93	407.51	439.88	1.08
6	60	-0.55	143.45	82.18	-0.07	-5.18	-0.14	144.49	436.77	3.02
7	0	-3.80	126.96	6.14	-1.59	-0.76	0.00	130.82	434.70	3.32
8	0	-6.00	126.62	33.40	0.07	-0.14	0.00	132.62	434.70	3.28
9	30	35.47	380.81	269.65	0.00	-8.69	-10.49	346.52	438.15	1.26
10 ^c	6	-90.87	120.68	52.16	-16.63	14.28	-19.04	219.77	438.15	1.99
11 ^d	0 - 6	-165.12	-113.37	-113.78	82.66	10.63	-92.53	251.44	350.52 ^d	1.39
12	0	124.27	114.68	13.46	3.80	4.90	-7.18	113.16	473.34	4.18
13	0	-28.91	-19.73	-9.73	0.83	3.80	-24.91	53.96	438.15	8.12
14 ^c	6	17.73	-69.28	1.10	36.02	35.74	-18.01	130.20	438.15	3.36
15 ^c	6	59.75	-9.94	2.35	-7.59	3.80	-12.14	74.45	438.15	5.88

^a 截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b 局部彎曲應力為次要應力，不列入本項評估。

^c 意外事故狀態不需考慮承壓應力。

^d 應力為撞擊區域的平均應力值。容許應力值已納入密封上蓋鉚道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-16 密封鋼筒正常壓力加 60 g 加速度垂直負載, P_m , MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	-0.76	5.45	1.86	-0.14	0.48	2.55	7.87	328.30	41.72
2	9.25	-63.89	-58.10	1.66	-0.14	-6.83	73.90	328.30	4.44
3	-3.59	-59.69	-33.19	-1.17	-0.21	6.42	57.48	325.34	5.66
4	-0.21	53.89	-29.39	0.00	0.00	0.00	83.28	309.12	3.71
5	-0.28	53.82	-26.01	-1.38	0.00	0.00	79.90	304.29	3.81
6	-0.28	53.89	-22.98	1.45	0.00	0.00	76.87	295.60	3.85
7	-0.35	53.82	-20.84	1.45	0.00	0.00	74.73	289.80	3.88
8	-0.35	53.82	-16.56	1.45	0.00	0.00	70.45	289.80	4.11
9	-0.35	54.65	-12.49	1.45	0.00	0.35	67.21	299.46	4.46
10	-4.69	-7.52	-14.01	0.00	0.00	9.04	20.36	299.46	14.71
11	-1.52	4.35	21.05	0.00	0.00	4.35	24.22	239.57 ^b	9.89
12	3.17	2.62	-8.42	-0.07	6.76	-6.56	22.01	325.34	14.78
13	0.28	0.28	-0.35	0.00	0.14	-0.14	0.69	299.46	434.0
14	-4.21	-4.49	-1.79	0.00	0.00	0.83	3.04	299.46	98.51
15	-4.62	-3.86	1.04	0.07	-0.14	0.97	6.00	299.46	49.91

^a 截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b 容許應力值已納入密封上蓋鉸道強度縮減因子 0.8。

表 6.2.A.2-17 密封鋼筒正常壓力加 60 g 加速度垂直負載, $P_m + P_b$, MPa

截面 ^a	應力分量						S_{int}	S_{allow}	FS
	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}			
1	13.73	54.30	-33.88	0.00	0.00	8.83	89.77	481.62	5.37
2	20.84	-98.46	-58.10 ^b	0.00	0.00	-10.28	120.68	481.62	3.99
3	-5.80	-86.18	-118.68	0.00	-0.07	4.90	113.30	473.34	4.18
4	-0.41	54.51	-29.12	1.45	0.00	0.07	83.70	441.60	5.28
5	-0.41	54.58	-25.88	1.45	0.00	-0.14	80.52	439.88	5.46
6	-0.48	54.58	-22.77	1.45	0.00	0.00	77.42	436.77	5.64
7	-0.48	54.58	-20.63	1.45	0.00	0.00	75.28	434.70	5.77
8	-0.55	54.51	-16.35	-1.45	0.00	0.00	70.93	434.70	6.13
9	-0.55	50.78	-26.70	1.31	0.00	0.41	77.56	438.15	5.65
10	-4.28	-19.73	-53.96	0.00	0.00	11.59	54.86	438.15	7.99
11	-10.97	-0.14	17.39	0.00	0.00	5.93	30.77	350.52 ^c	11.39
12	124.06	125.79	11.32	4.62	5.24	-6.49	118.96	473.34	3.98
13	6.35	6.35	-0.62	0.00	0.14	-0.14	6.97	438.15	62.86
14	-5.73	-5.52	-3.17	0.00	0.00	1.17	3.52	438.15	124.47
15	-11.39	-6.69	-2.00	0.07	-0.14	2.28	10.49	438.15	41.77

^a截面位置詳圖 6.2.A.2-2。

^b局部彎曲應力為次要應力，不列入本項評估。

^c容許應力值已納入密封上蓋鐸道強度縮減因子 0.8。

3 混凝土護箱有限元素模型

(1) 熱應力分析之混凝土護箱有限元素模型

使用 ANSYS 有限元素軟體建構混凝土護箱熱應力分析模型，其中分為包含與不包含鋼筋籠兩種模型，並針對正常與異常或是意外事故等情況進行分析。混凝土護箱包含 60 個週期性的徑向切面與 60 支垂直鋼筋，因此建構 6° 度(1/60th)混凝土護箱模型，模型只包含進氣口頂端與蓋板間的混凝土護箱外殼與鋼襯，因為環向與軸向鋼筋均配置在此區域。

熱傳導分析模型中，混凝土護箱外殼與鋼襯由 ANSYS SOLID70 元素建構，鋼襯與外殼接合處的節點使用溫度耦合。將模型垂直方向分為四部分，各等份的中間間隙為 2.5 mm (0.1 in)，並以 LINK33 元素建造此間隙，以容許各部份間的熱傳導，溫度可以在徑向和軸向變化。保守地使用異常狀況之環境溫度 41.1 °C (106°F) 來評估正常貯存情況，意外事故之環境溫度則採用 56.1 °C (133°F 極熱)，此外，使用 -40°C (-40°F 極冷) 之環境溫度進行異常狀況分析。溫度條件施加於混凝土護箱內外表面之節點上。

熱傳導模型轉變為結構分析模型時，將 SOLID70 元素轉換至 SOLID45 元素，四個垂直鋼襯之間使用 COMBIN14 元素，鋼襯與混凝土殼間使用 CONTAC52 元素，並容許壓力負載可以透過此間隙元素傳遞。除了鋼筋則由 LINK8 元素建造，軸向間隙也由 LINK8 建造並視為鋼筋的一種，以傳遞張力負載。一共有 16 軸向鋼筋配置於混凝土護箱內半徑和 60 支軸向鋼筋配置於外半徑，內部軸向鋼筋之性質根據 1/60th 模型的比例(即 16/60 之比例)估算，不包含鋼筋籠之混凝土護箱之分析中，須將所對應鋼筋之元素移除。有限元素模型如圖 6.2.A.3-1 與圖 6.2.A.3-2 所示，邊界條件如圖 6.2.A.3-3 所示。

(2) 傾倒分析之混凝土護箱有限元素模型

核二廠用過核子燃料乾式貯存之混凝土護箱外半徑為 2,123 mm (83.6 in)，滿載燃料後的重心為 2,972 mm (117 in)，混凝土護箱傾倒意外之前後重心高度落差為 1,529 mm (60.2 in)。評估時保守考慮混凝土護箱外半徑與重心高度考慮為 1,727 mm 與 2,817 mm，造成的混凝土護箱傾倒意外之前後重心高度落差為 1,577 mm (62.1 in)，可以有較大的傾倒撞擊速度。

混凝土護箱主要為了能長期容納密封鋼筒所設計，內部有一層鋼襯以增加混凝土強度，而燃料提籃頂部和密封鋼筒密封上蓋頂部為量測加速度的關鍵位置。

混凝土護箱傾倒分析中，使用 LS-DYNA 建立兩個半對稱有限元素模型，包含混凝土護箱、混凝土基座、土壤等，這些組件皆使用磚塊元素(Brick Element)建構。一個模

型使用標準尺寸的基座模型，另一個使用過尺寸(oversize)之基座模型，有限元素模型如圖 6.2.A.3-4 所示。

材料性質

下節將敘述所使用材料之機械性質，每一部份之密度將計入所有非結構性組件的重量，有限元素模型中並不建構非結構性組件。

混凝土：

假設混凝土為等向均勻之材料，並忽略鋼筋的強化效應。護箱與混凝土基座用的混凝土由 LS-DYNA 材料 16(Mat_Pseudo_Tensor)建造，代表混凝土結構模型。同時需要狀態方程式當作 LS-DYNA 分析軟體中的 EOS Tabulated_compaction。混凝土護箱之 LS-DYNA 輸入資料如下。

$$\begin{aligned}
 f'_c &= 27.58 \text{ MPa (4,000 psi)} \text{----- 抗壓強度} \\
 \rho_c &= 2.4 \times 10^{-10} \text{ Kg-sec}^2/\text{mm}^4 \text{ (148 pcf)} \text{---- 密度} \\
 \nu_c &= 0.22 \text{ ----- 柏松比} \\
 E_c &= 33\rho_c^{1.5} \sqrt{f'_c} = 3.758 \times 10^6 \text{ psi (2.6} \times 10^4 \text{ MPa)} \text{.....彈性係數} \\
 G_c &= \frac{E_c}{2(1+\nu_c)} = 1.1 \times 10^4 \text{ MPa (1.540} \times 10^6 \text{ psi)} \text{.....剪力模數} \\
 K_c &= \frac{E_c}{3(1-2\nu_c)} = 1.5 \times 10^4 \text{ MPa (2.237} \times 10^6 \text{ psi)} \text{.....體積模數} \\
 \epsilon_v &= \frac{f'_c}{K_c} = 0.001788 \text{ ----- 體積應變}
 \end{aligned}$$

使用上列相同公式，其混凝土基座需要的輸入資料如下。

f'_c (MPa)	ρ_c (Kg/mm ³)	E_c (MPa)	G_c (MPa)	K_c (MPa)	ϵ_v
34.47*	4.4×10^{-3}	3.3×10^4	1.3×10^4	1.9×10^4	0.001779

*實際的混凝土護箱與混凝土基座的抗壓強度皆為 27.58 MPa (4,000 psi)，但在混凝土護箱傾倒分析中會採用更保守的方式進行評估。混凝土護箱傾倒分析中採計混凝土護箱與混凝土基座的混凝土抗壓強度分別為 27.58 MPa (4,000 psi)與 34.47 MPa (5,000 psi)，使混凝土護箱在傾倒時撞擊抗壓強度較高的混凝土基座，造成較高的撞擊加速度，此為一保守評估的假設條件。

土壤：

使用彈性模型表示土壤之性質，材料性質如下。

$$\begin{aligned}
 \rho &= 1,602 \text{ kg/m}^3 \text{ (100 pcf)} \text{----- 密度} \\
 \nu_s &= 0.45 \text{ ----- 柏松比} \\
 E &= 2.1 \times 10^2 \text{ MPa (30,000 psi)} \text{----- 彈性係數}
 \end{aligned}$$

鋼襯：

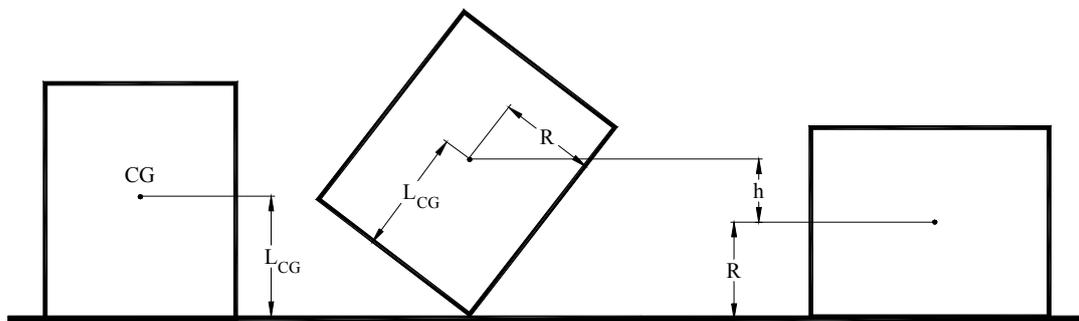
使用剛性模型來表示鋼襯之性質，材料性質如下。

$$\begin{aligned} \nu &= 0.31 \text{ ----- 柏松比} \\ E &= 2 \times 10^5 \text{ MPa } (29 \times 10^6 \text{ psi}) \text{ ----- 彈性係數} \end{aligned}$$

邊界條件

混凝土護箱與基座之間、基座與土壤之間、和護箱鋼襯與混凝土之間皆使用 Automatic _Surface_To_Surface 接觸條件。對稱邊界條件皆施加在每一個組件之對稱平面上，如圖 6.2.A.3-4。土壤底部之垂直位移與以及土壤三個垂直邊界之水平位移皆被拘束。

模擬傾倒分析中，在整個混凝土護箱施加初始角速度 ω ，此初始角速度由重力中心點之能量轉換求得，而混凝土護箱旋轉傾倒過程如下圖所示。



為了確保分析的準確性，LS-DYNA 輸出動能必須要和實際之位能比較，而傾倒過程中，位能轉換動能計算如下。

$$mgh = \frac{I\omega^2}{2}$$

其中

$$\omega = 1.527 \text{ rad/sec} \text{ ----- 混凝土護箱之角速度}$$

$$m = 356.3 \text{ kg}_m (785.6 \text{ lb}_m) \text{ ----- 混凝土護箱總質量}$$

$$g = 9.806 \text{ m/sec}^2 (386.4 \text{ in/sec}^2) \text{ ----- 重力加速度}$$

$$h = \sqrt{R^2 + L_{CG}^2} - R \text{ ----- 混凝土護箱中心之高度變化}$$

$$I \text{ ----- 混凝土護箱於旋轉點之總質量慣性矩 (LS-DYNA 自動計算)}$$

$$R = 1,727 \text{ mm } (68 \text{ in}) \text{ ----- 混凝土護箱之外半徑}$$

$$L_{CG} = 2,817 \text{ mm } (110.9 \text{ in}) \text{ ----- 混凝土護箱之重心高度}$$

傾倒過程中，混凝土護箱質量中心之位能改變量為 $2.12 \times 10^6 \text{ m-N}$ ($1.9 \times 10^7 \text{ in-lb}$)，在模型中使用 $2.26 \times 10^6 \text{ m-N}$ ($2.0 \times 10^7 \text{ in-lb}$) 的動能來涵蓋。

負載情況

使用涵蓋性負載來評估混凝土護箱傾倒意外事故。考慮兩種混凝土基座與土壤的組合來涵蓋所有的貯存配置：標準基座配置與過尺寸基座配置。標準基座配置使用典型之貯存基座特性與邊界條件；過尺寸基座配置則是用於敏感度分析，藉以了解增大基座尺寸對於加速度的影響。標準平板尺寸為 9144 mm (30 ft) \times 9144 mm (30 ft)，土壤為 10668 mm (35 ft) \times 10668 mm (35 ft)，過尺寸平板尺寸為 18288 mm (60 ft) \times 9144 mm (30 ft)，土壤為 21336 mm (70 ft) \times 10668 mm (35 ft)。

標準與過尺寸基座使用完全相同的參數與邊界條件，過尺寸基座之網格密度與元素長寬比也和標準平板模型一樣。

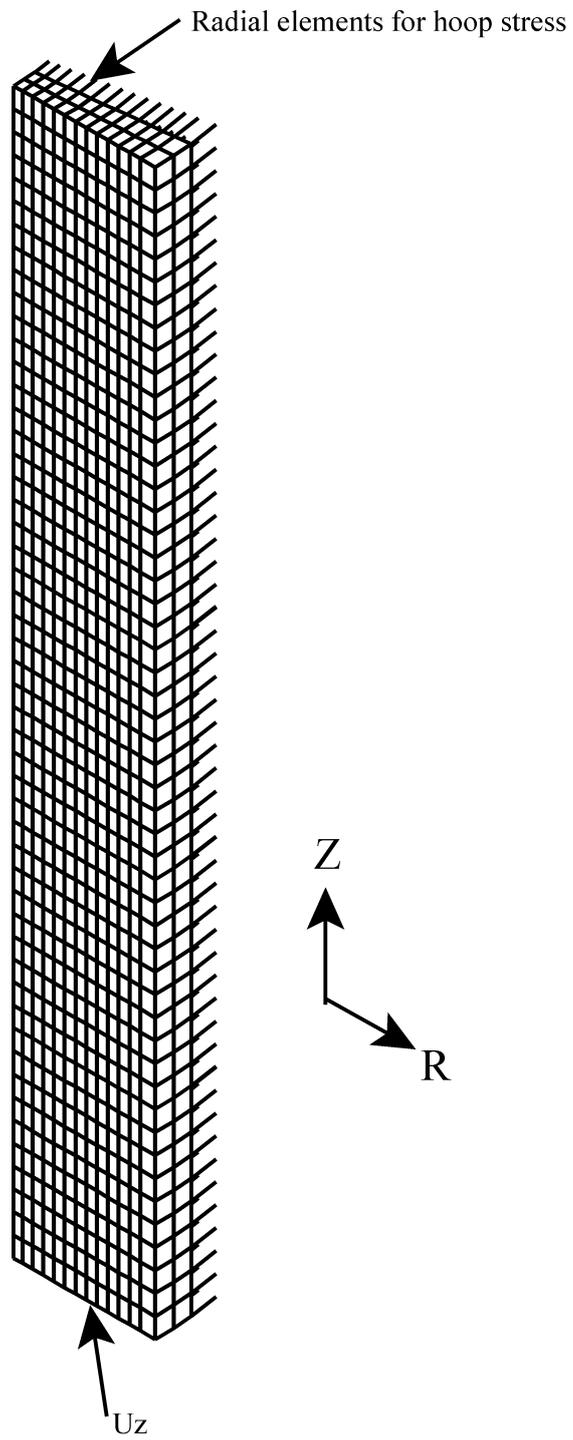


圖 6.2.A.3-1 混凝土護箱熱應力分析有限元素模型

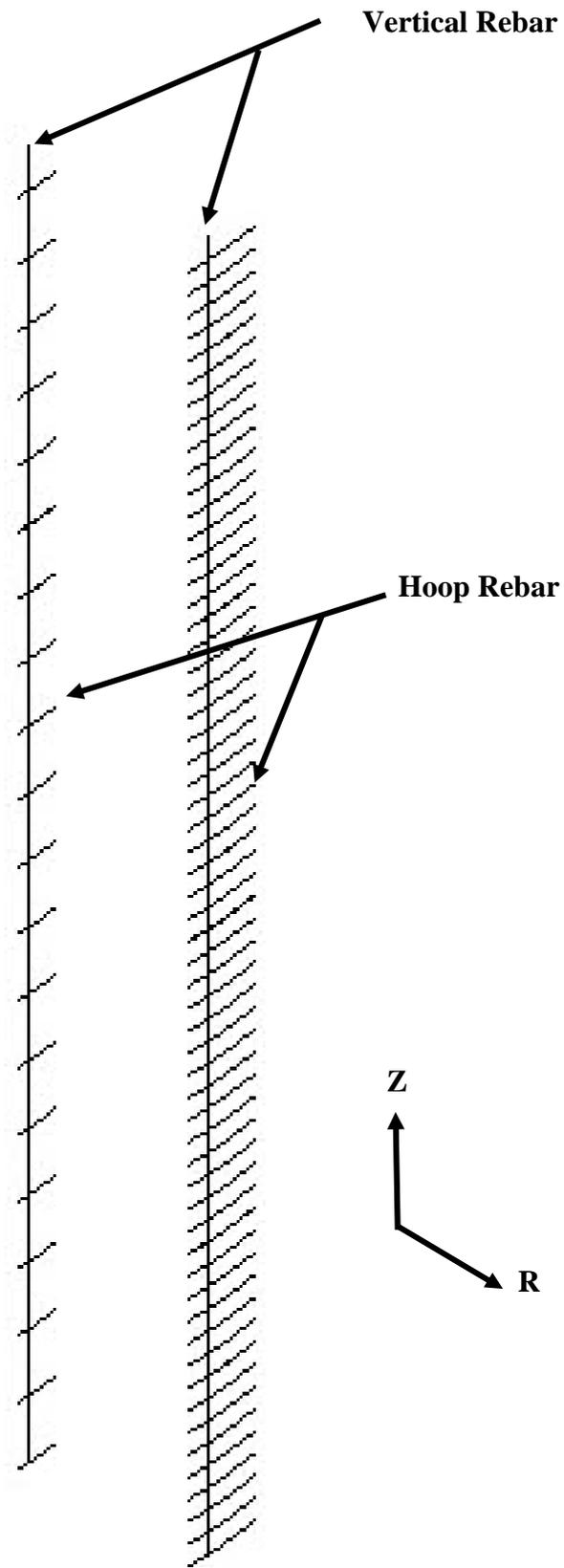


圖 6.2.A.3-2 混凝土模型-鋼筋元素

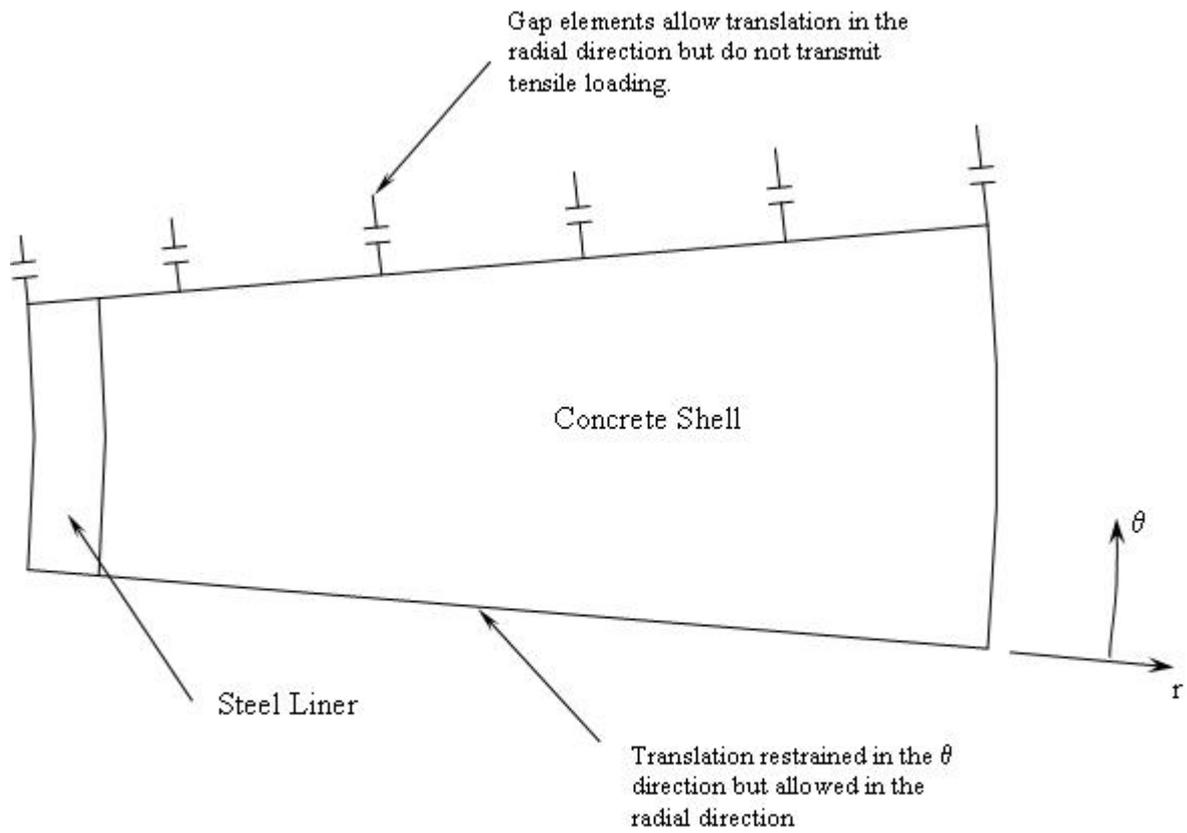
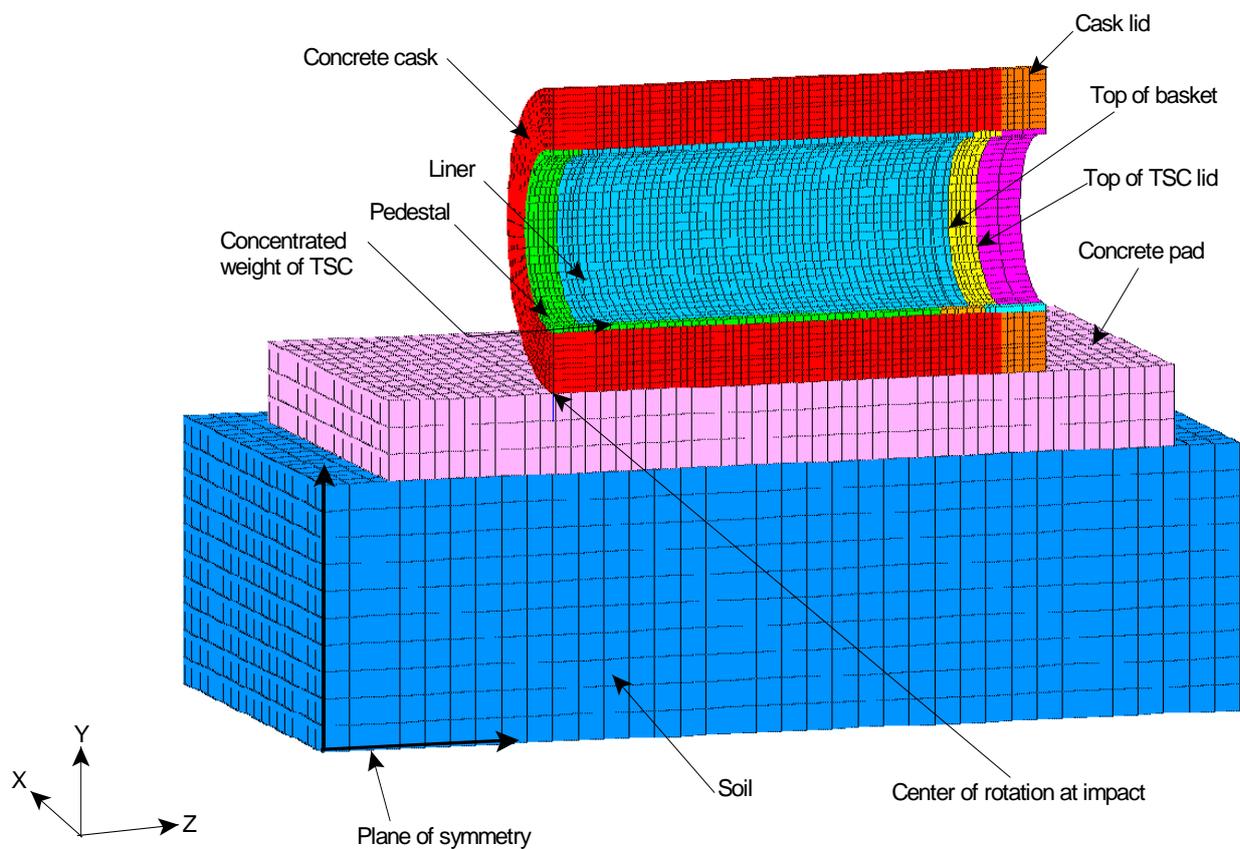


圖 6.2.A.3-3 混凝土邊界條件

標準基座模型



過尺寸基座模型

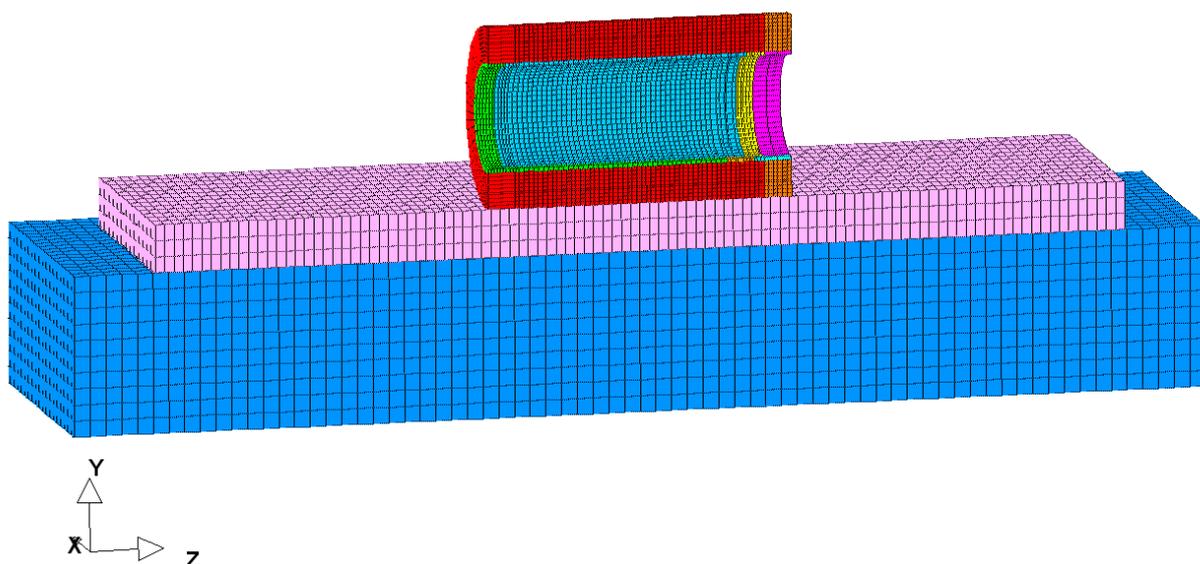


圖 6.2.A.3-4 傾倒分析有限元素模型

4 傳送護箱有限元素模型

(1) 傳送護箱垂直吊舉

傳送護箱模型分為三部分：頂端部分為碳鋼製的實心環，並有一對直徑為 228.6 mm (9 in) 之吊耳軸以 180° 嵌在環上；中間部分由內鋼殼、鉛層、中子屏蔽層、和外鋼殼所組成；底部部分也是為碳鋼製的實心環，並有一對軌道銲接在實心鍛件底部，而鋼門嵌入軌道上。傳送護箱整體高度為 5,013.2 mm (197.37 in)、直徑為 2,235.2 mm (88.0 in)。

本系統傳送護箱吊舉分析使用三維有限元素模型，又因對稱關係，所以建立四分之一有限元素模型，如圖 6.2.A.4-1 所示。模型包括吊耳軸、頂部環、內外殼、底部環、鉛層、以及內外殼之間的中子屏蔽層。這些組件皆使用 ANSYS SOLID45(8 節點磚塊元素)元素建造，而吊耳軸以銲接的方式部分穿入頂部環，因此在吊耳環和頂部環之交界以 CONTAC52 元素建造，吊耳軸與頂部環之間的開槽銲接以耦合節點表示。

受負載之傳送護箱總重不會超過 1,176.7 kN (120 tons)，分析時保守假設總重為 1,176.7 kN (120 tons) 以及增加 10% 的動態負載，因此四分之一模型重量為 $(1,176.7 \times 1.1)/4 = 323.6$ kN。此負載施加在吊耳軸底面表面，而拘束邊界條件施加在對稱面上，且在模型底部給於垂直方向之拘束。

(2) 密封鋼筒傳送時意外吊舉

密封鋼筒在傳送護箱中意外吊舉過程中，保護環組件應力分析之有限元素模型描述如下。保護環外徑為 1,066.8 mm (42 in)，內徑為 871.2 mm (34.3 in)，以 16 支螺栓(1 in A193 Grade B8)將保護環固定於傳送護箱上環部位。使用磚塊元素(SOLID45)建造保護環和螺栓之局部有限元素模型，如圖 6.2.A.4-2 所示。間隙元素(CONTAC52)建造螺栓與保護環之交接處(螺栓頭以下)，並且也用以模擬上環對保護環垂直移動之限制。垂直間隙元素建立在螺栓半徑之外，包含連結保護環底邊之節點與其他所有自由度都被拘束的節點。此外，拘束螺栓底座全部之自由度，以及拘束保護環底端周向方向之自由度。傳送護箱重量低於 489.3 kN (110,000 lb)，假設保守負載為 489.3 kN (110,000 lb) 以及增加 10% 的動態負載於分析模型中。此負載以表面壓力負載方式往上施加於保護環底面積，此面積範圍從保護環內徑至傳送護箱外徑，此表面壓力負載為 16,822 N (3,782 lb)，計算如下：

$$\text{Applied force} = (W_{\text{TFR}} \times \text{DLF}) \times L_{\text{Model}} / C_{\text{TSC}} = 16,822 \text{ N (3,782 lb)}$$

$$W_{\text{TFR}} = 489.3 \text{ kN (110,000 lb)} \text{-----保守之傳送護箱重量}$$

$$\text{DLF} = 1.1 \text{-----動態負載因子}$$

$C_{TSC} = 5,745.5 \text{ mm}(226.2 \text{ in})$ -----傳送護箱周長

$L_{Model} = 179.6 \text{ mm}(7.07 \text{ in})$ -----弧長

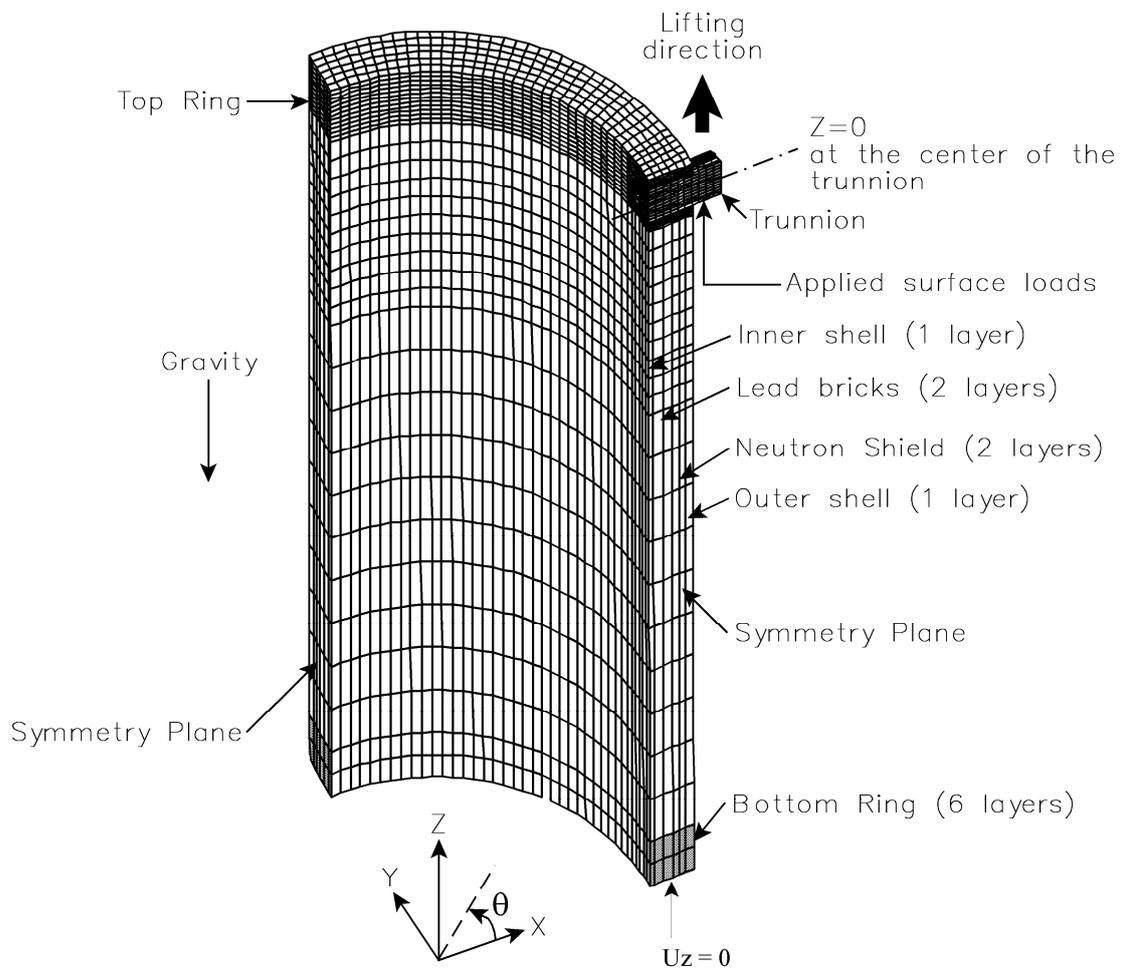


圖 6.2.A.4-1 傳送護箱有限元素模型

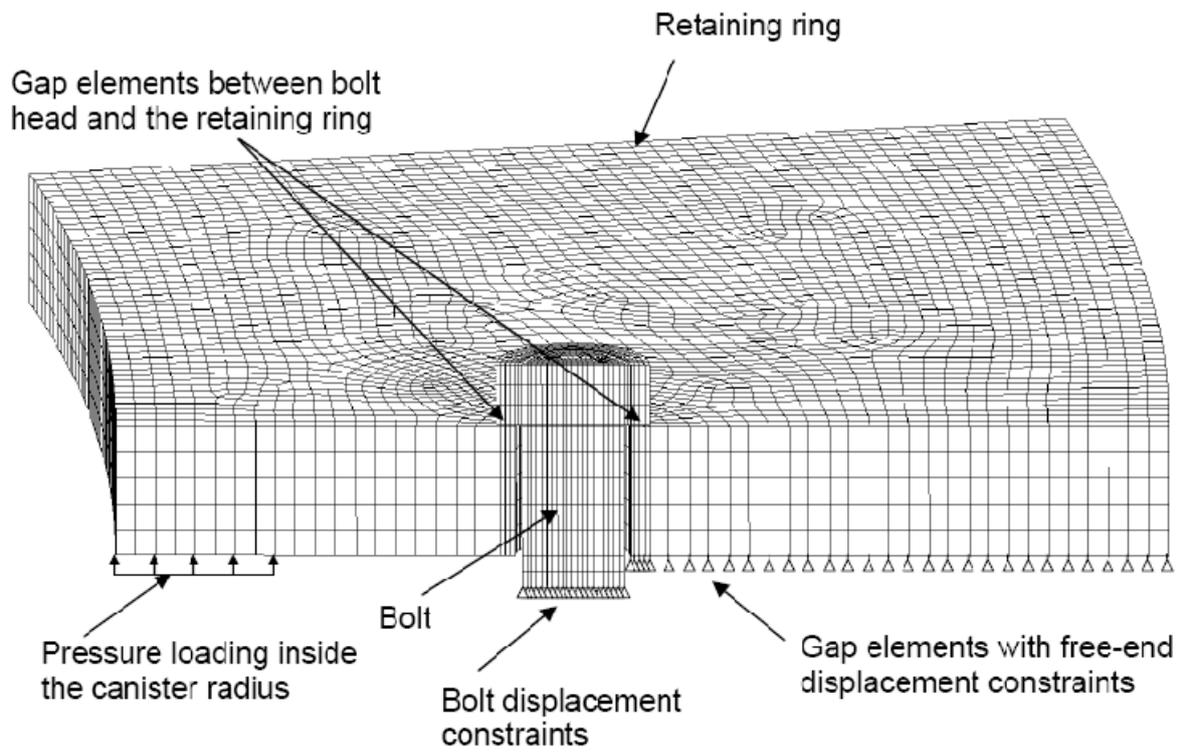


圖 6.2.A.4-2 傳送護箱保護環有限元素模型

5 土壤結構互制分析有限元素模型

圖 6.2.A.5-1 為核二乾式貯存場址的土壤結構互制分析模型的配置，圖中基座之長邊為 X 方向；短邊為 Y 方向；基座的法線方向為 Z 方向。在長方形的混凝土基座上方配置 27 個混凝土護箱，基座底下設置 27 支基樁，每一基樁設置於每一混凝土護箱正下方。貯存場址的設置參數如表 6.2.A.5-1。

混凝土基座設計

長度 $L = 76.5 \text{ m}$

寬度 $B = 13.5 \text{ m}$

厚度 $t = 1.0 \text{ m}$

重量 $W_p = 22.7592 \text{ kn/m}^3 (2.32 \text{ ton/m}^3 \times 9.81 = 22.7592)$

阻尼 $d_p = 7\%$

彈性係數 $E = 24,855,576 \text{ kn/m}^2 (57,000 \times 4,000^{1/2}) = 3,604,996.533 \text{ psi} = 24,855,576 \text{ kn/m}^2$

柏松比 $\nu_p = 0.15$

混凝土護箱設計

直徑 $D = 4.25 \text{ m}$

高度 $H = 5.95 \text{ m}$

重心 $C.G = 3.0 \text{ m}$

重量 $W_c = 2,425.5 \text{ kn} (250 \text{ ton} \times 9.81 = 2,452.5 \text{ kn})$

重量慣性舉 $W_{xx} = W_{yy} = 10,005.56 \text{ kn-m}^2$

$$W_{zz} = 5,537.29 \text{ kn-m}^2$$

阻尼 $d_c = 7\%$

彈性係數 $E = 24,855,576 \text{ kn/m}^2$

柏松比 $\nu_p = 0.15$

保守假設裝填燃料後的混凝土護箱的自然頻率為 33Hz，則基座上的混凝土護箱在結構分析上可表示為樑的型態

長度 $L = 3.0 \text{ m}$

面積 $A = 1.291 \text{ m}^2$

慣性舉 $I = 8.544594 \text{ m}^4$ (水平頻率為 33Hz)

頻率 $f = (1/2\pi)(K/M)^{1/2} = 32.92 \text{ Hz}$

其中

$$K = EA/L = 24,855,576 \times 1.291/3 = 10,696,182.87$$

$$M = W/g = 2,452.5/9.81 = 250.0$$

基樁設計

直徑 $D = 1.8 \text{ m}$

長度 $L = 12.25 \text{ m}$

重量 $W_{\text{pile}} = 22.7592 \text{ /m}^3$

阻尼 $d_{\text{pile}} = 7\%$

彈性係數 $E = 24,855,576 \text{ kn/m}^2$

柏松比 $\nu_{\text{pile}} = 0.15$

截面積 $A = 2.5447 \text{ m}^2$

剪力面積 $A_s = 0.9 A = 2.2902 \text{ m}^2$

慣性舉 $I = (1/4) \pi R^4 = 0.5153 \text{ m}^4$

扭矩常數(Torsion Constant) $J = 2 \times I = 1.0306 \text{ m}^4$

核二乾貯的作業規畫為將所有混凝土護箱於混凝土基座上完成澆注，再以傳送護箱逐一將裝載燃料之密封鋼筒填裝於混凝土護箱中。所以裝載燃料之密封鋼筒在整個建置過程中逐步填滿各個混凝土護箱。為了簡化並使評估結果足以涵蓋整個乾式貯存設施的建置過程，將土壤結構互制分析分為三階段進行評估，分別為初期、中期與晚期。初期為 1 個混凝土護箱裝填燃料，其餘 26 個護箱未裝填；中期為 14 個混凝土護箱裝填燃料，其餘 13 個護箱未裝填；晚期為所有 27 個混凝土護箱全部完成裝填燃料。

另外為了使評估結果有更廣泛的涵蓋面，除了由實際地質調查所取得的最佳估算土壤數據(Best Estimate, BE)進行土壤結構互制評估之外，也進行土層參數的評估，分別為下界限(Lower Bound, LB)土壤數據與上界限(Upper Bound, UB)土壤數據。三種土壤特性請參考表 6.2.A.5-2 至表 6.2.A.5-4。

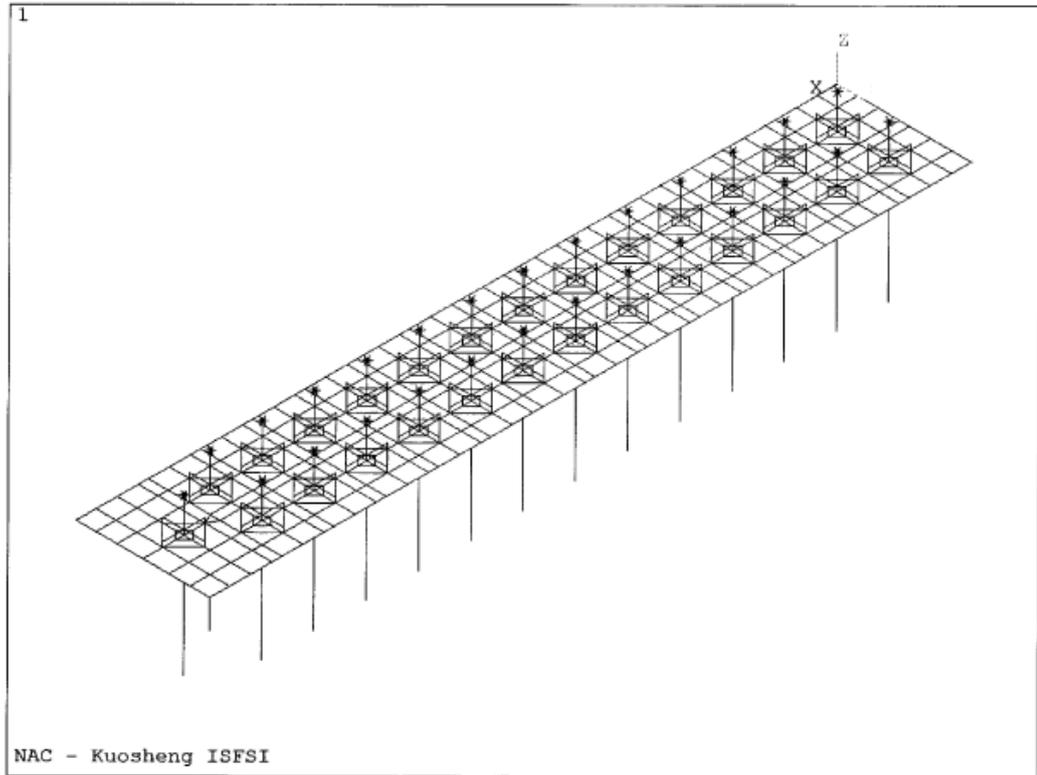


圖 6.2.A.5-1 ISFSI 系統的結構模型

表 6.2.A.5-1 場址設計參數

組件	參數	數值	備註
混凝土護箱(27 個護箱)	外徑	425 cm	
	高度	595 cm	
	重量(裝填燃料)	25,000 kg	涵蓋計算值 236,500 kg
	重心位置	300 cm	保守涵蓋計算值 297 cm
	混凝土密度	2,320 kg/m ³	145 pcf
	抗壓強度	280 kg/cm ²	4,000 psi
混凝土基座	尺寸(長 x 寬)	76.5 x 13.5 (m)	
	厚度	100 cm	
	混凝土密度	2,320 kg/m ³	145 pcf
	抗壓強度	280 kg/cm ²	4,000 psi
	基座表面高程	12.3 m	
基樁(27 支基樁；每一護箱底下各安裝一支基樁)	外徑	180 cm	
	長度	10.5 至 13.5 m	
	密度	2,320 kg/m ³	145 pcf
	抗壓強度	280 kg/cm ²	4,000 psi

表 6.2.A.5-2 地質調查之土壤數據(Best Estimate, BE)土壤數據

Layer	Thickness (m)	Weight (kn/m ³)	Vs (mps)	Vp (mps)	Damping Vs	Damping Vp
1	0.3750	19.2458	126.02	508.85	0.0390	0.0390
2	0.3750	19.2458	109.30	441.35	0.0750	0.0750
3	0.6250	18.9188	106.32	483.88	0.1060	0.1000
4	0.6250	18.9188	84.96	386.66	0.1480	0.1000
5	0.6250	18.9188	69.61	316.82	0.1500	0.1000
6	0.6250	18.9188	52.48	238.86	0.1500	0.1000
7	0.7500	19.9201	71.70	273.27	0.1500	0.1000
8	0.7500	19.9201	57.59	219.51	0.1500	0.1000
9	0.7500	20.0680	82.66	304.07	0.1500	0.1000
10	0.7500	20.0680	71.58	263.30	0.1500	0.1000
11	1.0000	19.2843	131.69	467.18	0.1500	0.1000
12	1.0000	19.2843	126.02	447.06	0.1500	0.1000
13	1.5000	23.3790	323.59	970.00	0.0770	0.0770
14	1.0000	20.9005	465.28	1265.55	0.0610	0.0610
15	1.5000	22.9999	544.51	1627.71	0.0520	0.0520
16	1.0000	21.9643	922.97	2317.91	0.0120	0.0120
17	3.5000	22.4354	1008.93	2458.22	0.0110	0.0110
18	3.5000	21.9214	917.24	2342.46	0.0130	0.0130
19	1.5000	21.0640	965.46	2362.32	0.0130	0.0130
20	3.0000	21.5085	1061.87	2435.72	0.0120	0.0120
21	1.5000	21.7913	1106.34	2586.88	0.0120	0.0120
22	3.0480	22.5997	1207.05	2678.11	0.0120	0.0120
23	3.0480	22.5997	1204.45	2672.34	0.0120	0.0120
24	3.0480	22.5997	1202.12	2667.18	0.0120	0.0120
25	3.0480	22.5997	1199.77	2661.96	0.0130	0.0130
26	3.0480	22.5997	1197.53	2656.98	0.0130	0.0130
27	3.0480	22.5997	1195.48	2652.45	0.0130	0.0130
28	3.0480	22.5997	1193.61	2648.30	0.0130	0.0130
29	3.0480	22.5997	1191.90	2644.49	0.0140	0.0140
30	3.0480	22.5997	1190.33	2641.00	0.0140	0.0140
31	Halfspace	22.5997	1242.23	2756.16	0.0055	0.0055

表 6.2.A.5-3 下界限(Lower Bound, LB)土壤數據

Layer	Thickness (m)	Weight (kn/m ³)	Vs (mps)	Vp (mps)	Damping Vs	Damping Vp
1	0.3750	19.2458	80.91	326.70	0.0650	0.0650
2	0.3750	19.2458	55.95	225.91	0.1470	0.1000
3	0.6250	18.9188	40.98	186.49	0.1500	0.1000
4	0.6250	18.9188	26.98	122.78	0.1500	0.1000
5	0.6250	18.9188	26.98	122.78	0.1500	0.1000
6	0.6250	18.9188	26.98	122.78	0.1500	0.1000
7	0.7500	19.9201	30.64	116.79	0.1500	0.1000
8	0.7500	19.9201	30.64	116.79	0.1500	0.1000
9	0.7500	20.0680	34.96	128.61	0.1500	0.1000
10	0.7500	20.0680	34.96	128.61	0.1500	0.1000
11	1.0000	19.2843	59.20	210.00	0.1500	0.1000
12	1.0000	19.2843	56.48	200.36	0.1500	0.1000
13	1.5000	23.3790	202.70	607.61	0.1100	0.1000
14	1.0000	20.9005	299.15	813.69	0.0840	0.0840
15	1.5000	22.9999	354.19	1058.78	0.0720	0.0720
16	1.0000	21.9643	645.06	1619.96	0.0130	0.0130
17	3.5000	22.4354	704.38	1716.20	0.0130	0.0130
18	3.5000	21.9214	639.49	1633.15	0.0140	0.0140
19	1.5000	21.0640	672.75	1646.10	0.0150	0.0150
20	3.0000	21.5085	739.82	1697.01	0.0140	0.0140
21	1.5000	21.7913	770.73	1802.13	0.0140	0.0140
22	3.0480	22.5997	840.93	1865.78	0.0140	0.0140
23	3.0480	22.5997	839.06	1861.64	0.0140	0.0140
24	3.0480	22.5997	837.43	1858.03	0.0140	0.0140
25	3.0480	22.5997	835.81	1854.42	0.0150	0.0150
26	3.0480	22.5997	834.21	1850.88	0.0150	0.0150
27	3.0480	22.5997	832.17	1846.36	0.0150	0.0150
28	3.0480	22.5997	829.63	1840.72	0.0150	0.0150
29	3.0480	22.5997	827.32	1835.59	0.0150	0.0150
30	3.0480	22.5997	825.21	1830.91	0.0150	0.0150
31	Halfspace	22.5997	878.39	1948.90	0.0055	0.0033

表 6.2.A.5-4 上界限(Upper Bound, UB)土壤數據

Layer	Thickness (m)	Weight (kn/m ³)	Vs (mps)	Vp (mps)	Damping Vs	Damping Vp
1	0.3750	19.2458	185.41	748.66	0.0280	0.0280
2	0.3750	19.2458	170.38	687.98	0.0520	0.0520
3	0.6250	18.9188	171.14	778.89	0.0710	0.0710
4	0.6250	18.9188	154.78	704.42	0.0980	0.0980
5	0.6250	18.9188	140.18	637.96	0.1220	0.1000
6	0.6250	18.9188	123.49	561.99	0.1450	0.1000
7	0.7500	19.9201	153.08	583.47	0.1300	0.1000
8	0.7500	19.9201	138.34	527.25	0.1470	0.1000
9	0.7500	20.0680	174.96	643.61	0.1300	0.1000
10	0.7500	20.0680	165.75	609.73	0.1390	0.1000
11	1.0000	19.2843	252.92	897.23	0.1050	0.1000
12	1.0000	19.2843	246.54	874.62	0.1110	0.1000
13	1.5000	23.3790	507.78	1522.12	0.0520	0.0520
14	1.0000	20.9005	706.94	1922.85	0.0420	0.0420
15	1.5000	22.9999	812.59	2429.07	0.0360	0.0360
16	1.0000	21.9643	1320.96	3317.38	0.0100	0.0100
17	3.5000	22.4354	1443.61	3517.31	0.0090	0.0090
18	3.5000	21.9214	1316.04	3360.94	0.0110	0.0110
19	1.5000	21.0640	1385.55	3390.23	0.0110	0.0110
20	3.0000	21.5085	1522.49	3492.32	0.0100	0.0100
21	1.5000	21.7913	1585.97	3708.35	0.0100	0.0100
22	3.0480	22.5997	1728.54	3835.15	0.0100	0.0100
23	3.0480	22.5997	1725.70	3828.86	0.0100	0.0100
24	3.0480	22.5997	1723.00	3822.85	0.0100	0.0100
25	3.0480	22.5997	1720.34	3816.97	0.0110	0.0110
26	3.0480	22.5997	1717.88	3811.50	0.0110	0.0110
27	3.0480	22.5997	1715.63	3806.50	0.0110	0.0110
28	3.0480	22.5997	1713.10	3800.90	0.0110	0.0110
29	3.0480	22.5997	1710.46	3795.03	0.0120	0.0120
30	3.0480	22.5997	1707.97	3789.52	0.0120	0.0120
31	Halfspace	22.5997	1756.77	3897.80	0.0055	0.0033

6 混凝土護箱在混凝土基座上的穩定度分析

分析時保守以 556,169 lbs 的裝填燃料後的混凝土護箱的重量含蓋實際的 500,000 lbs 的重量。整合混凝土護箱與密封鋼筒為一單純的圓柱體，不另外建構密封鋼筒模型。視混凝土基座為一剛體；混凝土護箱中心部份視為剛體，外部為一彈性體，此保守假設可增加混凝土護箱的剛性，並增加固定樁的受力。

計算時採用造成最大水平加速度的歷時曲線，以涵蓋混凝土護箱與固定樁的計算結果。若所選的該組歷時曲線所屬的其他方向上的最大的加速度(PGA)未達 0.78 g，則該曲線全數線性放大至該最大加速度達 0.78 g。加速度歷時曲線採用表 6.2.6.4-11 之 BE 與 UB 狀況共 6 筆混凝土基座之加速度歷時，其可涵蓋所有 LB 的狀況。因為每一混凝土護箱都有相同的拘束條件，混凝土護箱因為受到固定樁的拘束只能位移 0.5 in，無法影響到其他相鄰護箱，並且分析中所採用的為涵蓋性的加速度歷時曲線，故只模擬一個混凝土護箱即可說明所有護箱的情況。

對混凝土材料使用 5%的臨界阻尼係數(critical damping)，保守使用較小的臨界阻尼，使混凝土護箱較易滑動，並且也增加固定樁受力的可能性。在混凝土護箱外部以彈塑性材料模擬，假設其強度為 100,000 psi，此保守的大降伏強度材料的假設會明顯增加固定樁的受力。分析模型考慮兩種混凝土護箱與基座間的摩擦係數 0.7 和 0.35[10]，因為固定樁拘束護箱的滑動行為，使得摩擦係數對於混凝土護箱穩定度分析的影響並不顯著。

材料模型

混凝土護箱為彈塑性模型，除了混凝土護箱內部部分使用剛體材料*Mat_Rigid (LS-DYNA Mat_20)以外，其餘使用*Mat_Piecewise_Linear_Plasticity (LS-DYNA Mat_24)。混凝土基座使用剛體材料*Mat_Rigid。固定樁使用彈性體材料模型*Mat_Elastic (LS-DYNA Mat_001)。

分析時各元件所採用的機械性質說明如下：

混凝土護箱外部

質量密度 = $2.501E-4 \text{ lb-sec}^2/\text{in}^4$

彈性係數 = 3.6E6 psi

柏松比 = 0.31

降伏強度 = 1.0E5 psi

切線模數(Tangent Modulus) = 1.0E4 psi

破斷應變(Failure Strain) = 0.21

混凝土護箱內部

質量密度 = $2.501\text{E-}4 \text{ lb-sec}^2/\text{in}^4$

彈性係數 = $3.6\text{E}6 \text{ psi}$

柏松比 = 0.31

混凝土基座

質量密度 = $2.172\text{E-}4 \text{ lb-sec}^2/\text{in}^4$

彈性係數 = $3.6\text{E}6 \text{ psi}$

柏松比 = 0.31

固定樁

質量密度 = $7.35\text{E-}2 \text{ lb-sec}^2/\text{in}^4$

彈性係數 = $2.66\text{E}7 \text{ psi}$

柏松比 = 0.31

負載，邊界條件與加速度

負載

分析中考慮裝填燃料的混凝土護箱的自身重量，並於垂直方向施加 1 g 加速度。

邊界條件

分析時拘束混凝土護箱的旋轉的自由度，在 LS-DYNA 程式使用 *Boundary_Prescribed_Motion_Rigid 指令施加加速度歷時於混凝土基座上。

加速度

由土壤結構互制分析得到每一混凝土護箱坐落位置的混凝土基座的地震加速度歷時曲線，本計算所選用的為各狀況下的最大水平地震加速度所屬的歷時曲線，各組歷時曲線的最大加速度(PGA)未達 0.78 g 者，則放大至 0.78 g。

有限元素模型說明

圖 6.2.A.6-1 所示為整個混凝土護箱穩定性分析的有限元素模型，個別模型說明如下。

混凝土護箱

圖 6.2.A.6-2 所示為混凝土護箱有限元素模型。混凝土護箱為實體元素，分為內部與外部兩部份。

固定樁

圖 6.2.A.6-3 所示為固定樁有限元素模型。固定樁為實體元素，插入於混凝土基座中，但未與混凝土基座連結(附著)。

混凝土基座

圖 6.2.A.6-4 所示為混凝土基座有限元素模型，混凝土基座為實體元素。模型中未放置固定樁，基座中的固定樁的孔直徑等於固定樁的直徑。

接觸模擬

混凝土護箱、混凝土基座與固定樁的接觸行為與相互作用，以 LS-DYNA 程式之 *Contact_Automatic_Single_Surface 接觸指令執行接觸模擬計算。

固定樁剪力評估

使用 LS-DYNA 程式之 *DATABASE_CROSS_SECTION_SET 指令評估固定樁剪力。

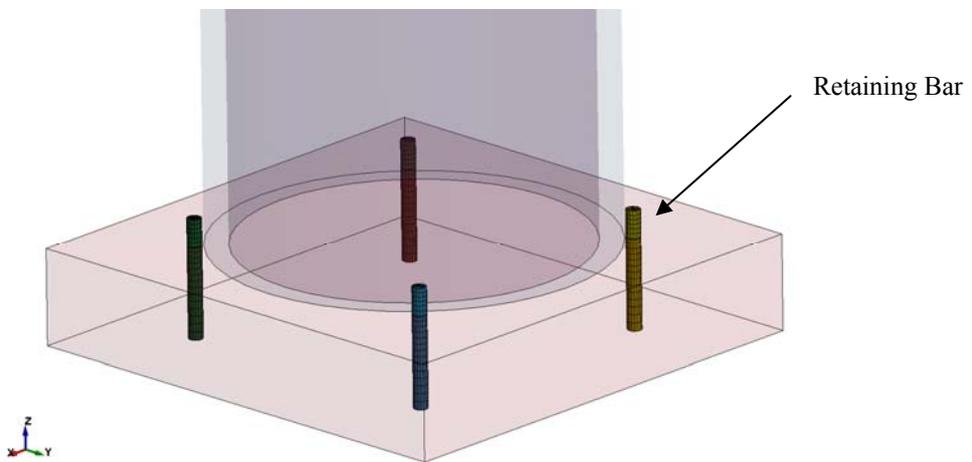
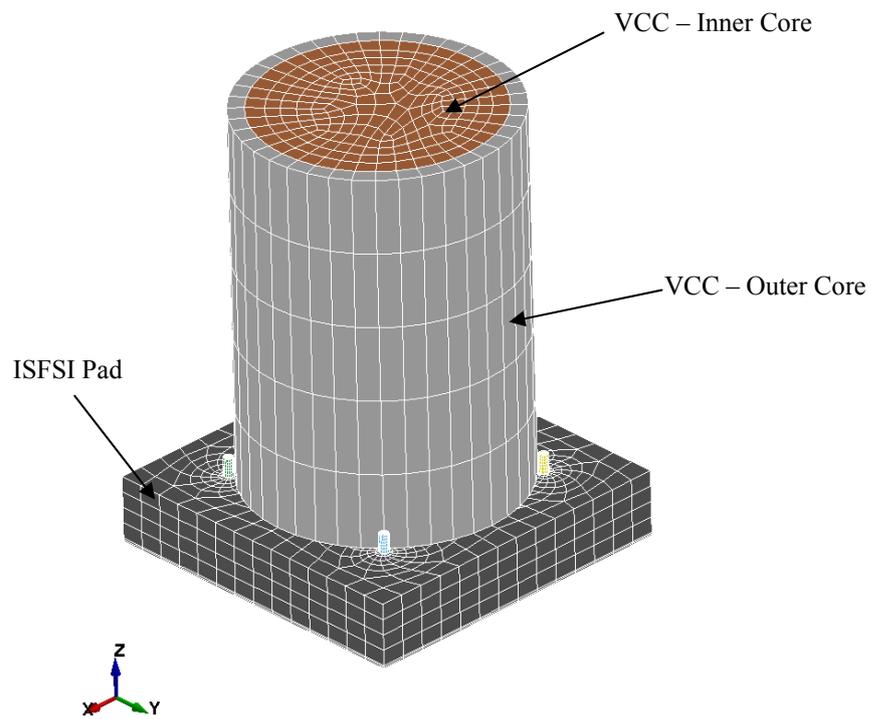


圖 6.2.A.6-1 混凝土護箱在混凝土基座上的有限元素地震分析模型

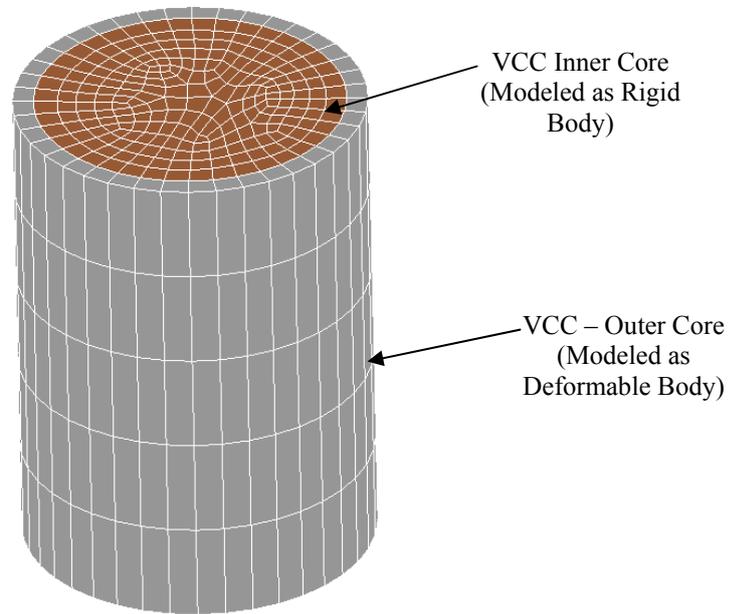


圖 6.2.A.6-2 有限元素模型 - 混凝土護箱

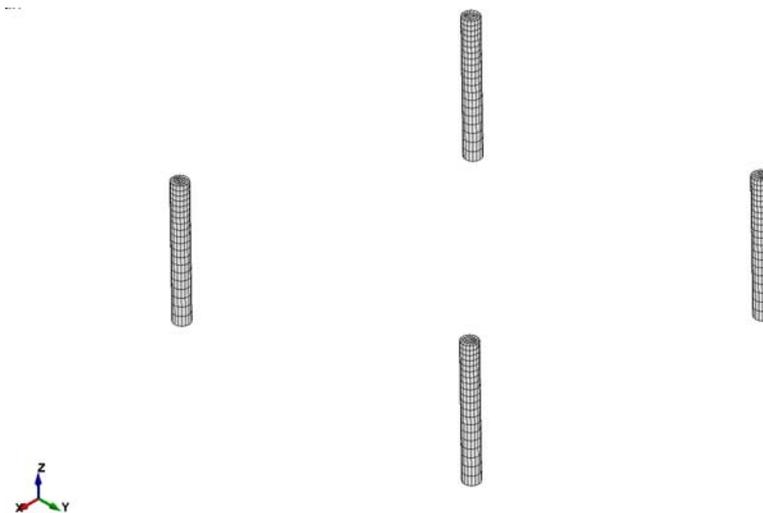


圖 6.2.A.6-3 有限元素模型 - 固定樁

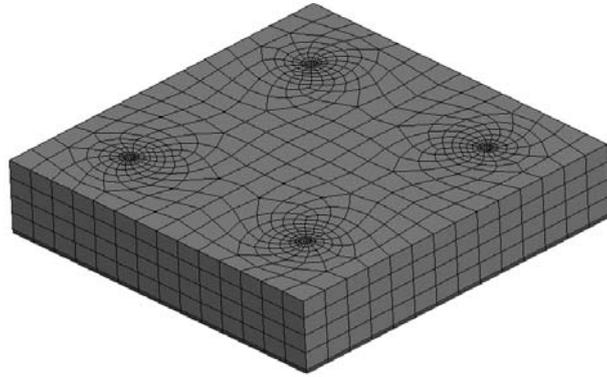


圖 6.2.A.6-4 有限元素模型 - ISFSI 混凝土基座

7 傳送護箱傾倒分析有限元素模型

如圖 6.2.A.7-1 所示為傳送護箱之有限元素模型。該模型包含了在傳送護箱傾倒事件下之主要原件。利用 ANSYS 三維固體元素建立網格模型再將模型輸入至 LS-DYNA 971 進行傾倒動態分析。考慮各主要原件之間再傳送護箱傾倒時的相互作用，在建立有限元素模型時，採個別建構護箱中子屏蔽層、傳送護箱內層以及外層鋼殼的方式進行。保護環螺栓係利用樑元素建立，而護箱頂部環與螺栓之間則透過施加節點剛體(nodal rigid bodies)來模擬螺栓與頂部環之間因傾倒撞擊而產生的相對位移變化。傳送護箱底部環及屏蔽門滑軌之間鉸件則利用 LS-DYNA 971 中之 *Contact_Tied_Nodes_To_Surface 功能模擬二者之間之接觸行為。以該模型同樣使用 ANSYS 有限元素程式建構密封鋼筒三維分析模型，如圖 6.2.A.7-2；在密封鋼筒外殼、密封頂蓋及密封環之間的鉸件亦同樣透過施加節點剛體條件以模擬因傾倒撞擊而產生的相對位移行為。圖 6.2.A.7-3 為防撞緩衝器(impact limiter)之有限元素模型。緩衝器外層金屬部分使用殼元素建立；內部之泡棉(foam)則利用三維固體元素建立。

在材料性質設定方面，傳送護箱及密封鋼筒組件係利用 LS-DYNA 971 之 *Mat_Piecewise_Linear_Plasticity (Mat_24)設定以模擬材料的彈塑性行為。燃料提籃組件則假設為剛性體並利用 *Mat_Rigid (Mat_20)設定模擬。圖 6.2.A.7-4 為裝載之傳送護箱在傾倒情況下之有限元素模型。透過 LS-DYNA 之 *Mat_Rigid (Mat_20)指令設定撞擊地面為一無限延伸之剛性體。NS-4-FR 中子屏蔽材料以及防撞緩衝器內部之泡棉則利用 LS-DYNA971 之 *Mat_Crushable_Foam (Mat_63)指令設定模擬。傳送護箱實際運轉溫度為 0°C (32°F)至 41.1°C (106°F)。然而在此傾倒分析中，本報告考慮四種特殊分析狀況，分別為：

狀況 1：環境溫度為 -28.89°C (-20°F)；

狀況 2：環境溫度為 60°C (140°F)；

狀況 3：環境溫度為 -28.89°C (-20°F)以及增加 15%防撞緩衝器泡棉潰縮強度；

狀況 4：環境溫度為 60°C (140°F)以及減少 15%防撞緩衝器泡棉潰縮強度。

藉由以上各分析狀況，透過 LS-DYNA 971 程式可計算得到傳送護箱在各極端溫度下發生傾倒時之加速度以及最大應力強度，由表 6.2.6.6-1 所列安全係數結果可知傳送護箱在傾倒事件下之應力結果皆能滿足 ASME Section III-Appendix F, Subsection F-1341.2 之規定。

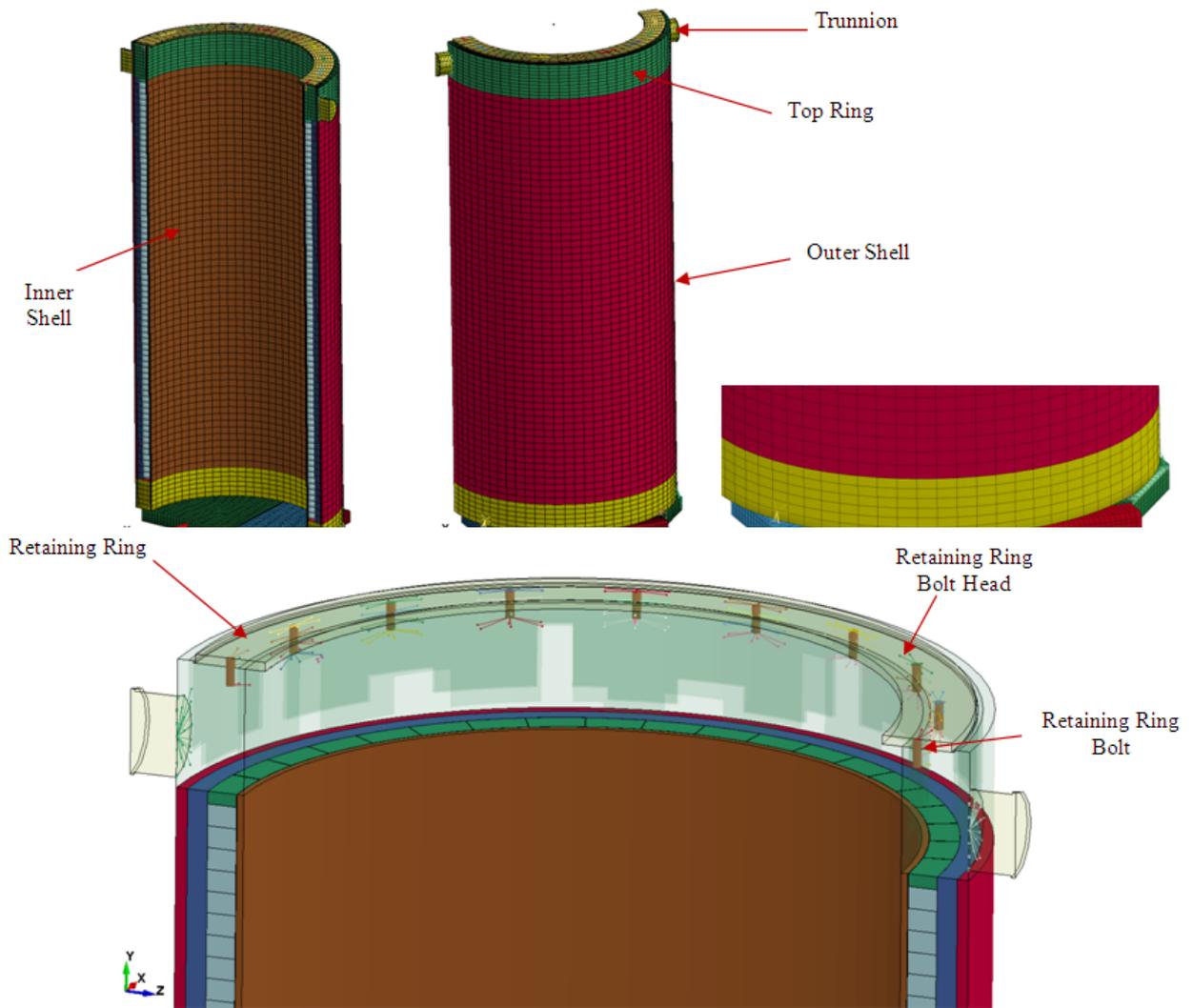


圖 6.2.A.7-1 傳送護箱有限元素模型

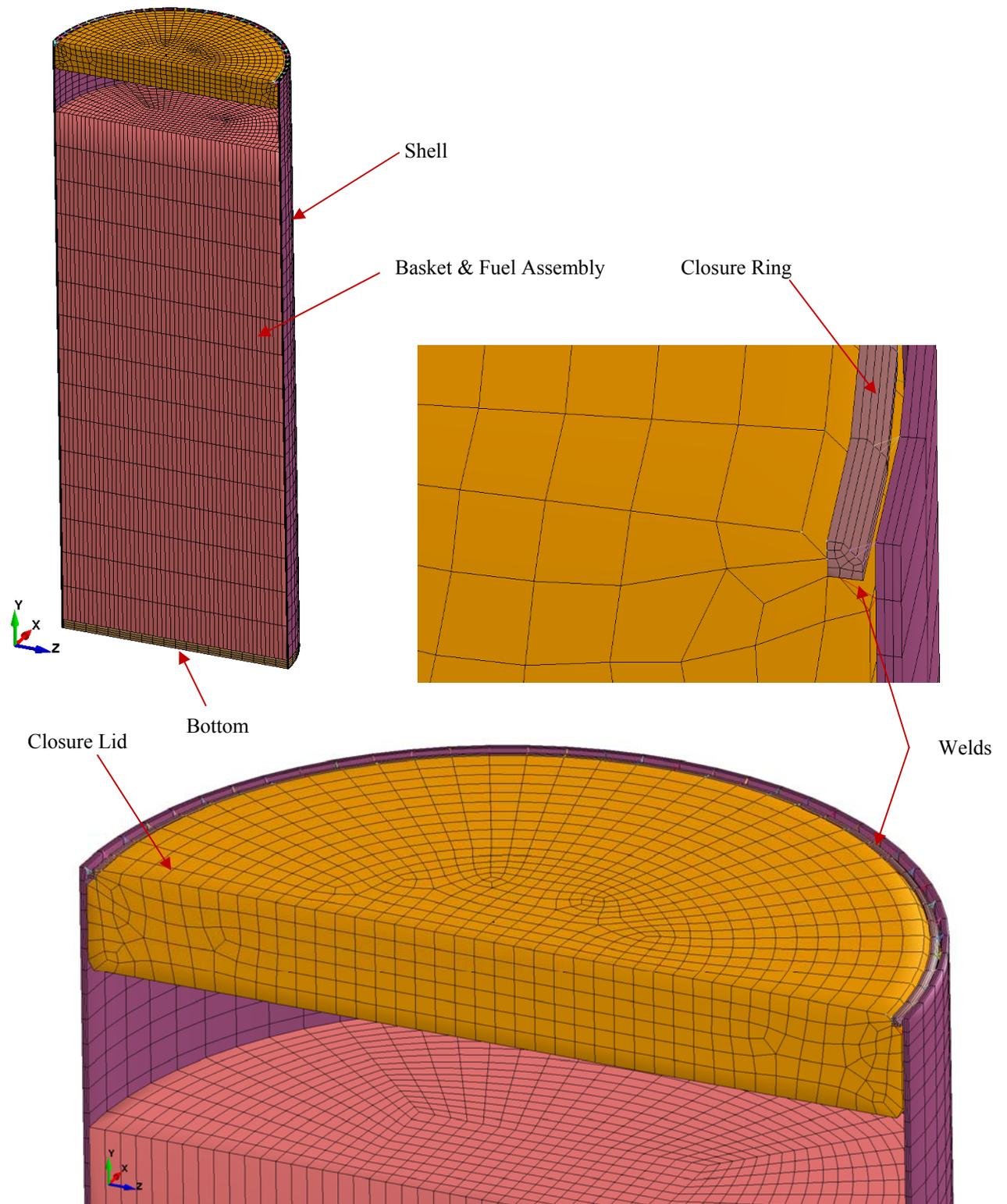


圖 6.2.A.7-2 密封鋼筒有限元素模型

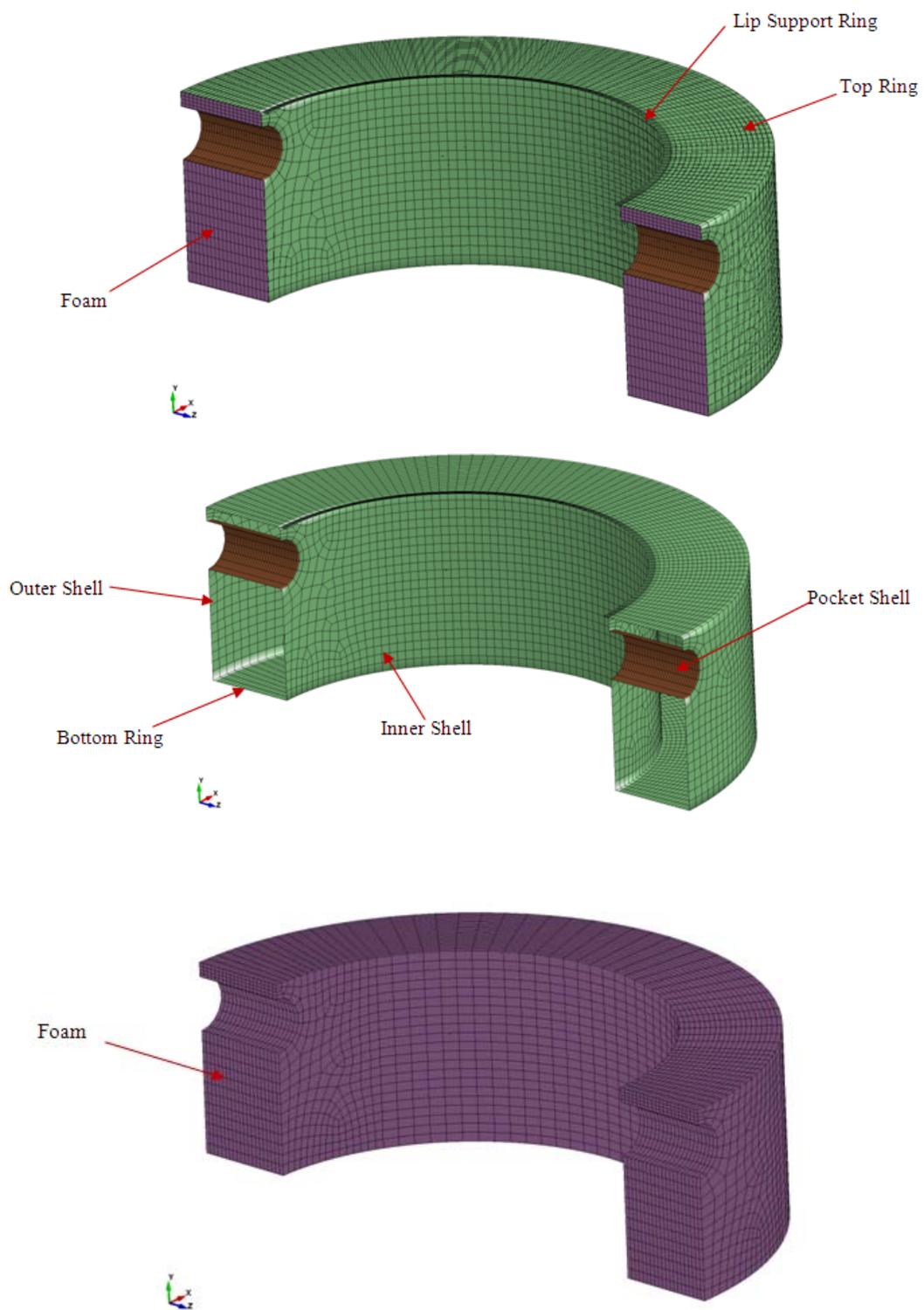


圖 6.2.A.7-3 防撞緩衝器有限元素模型

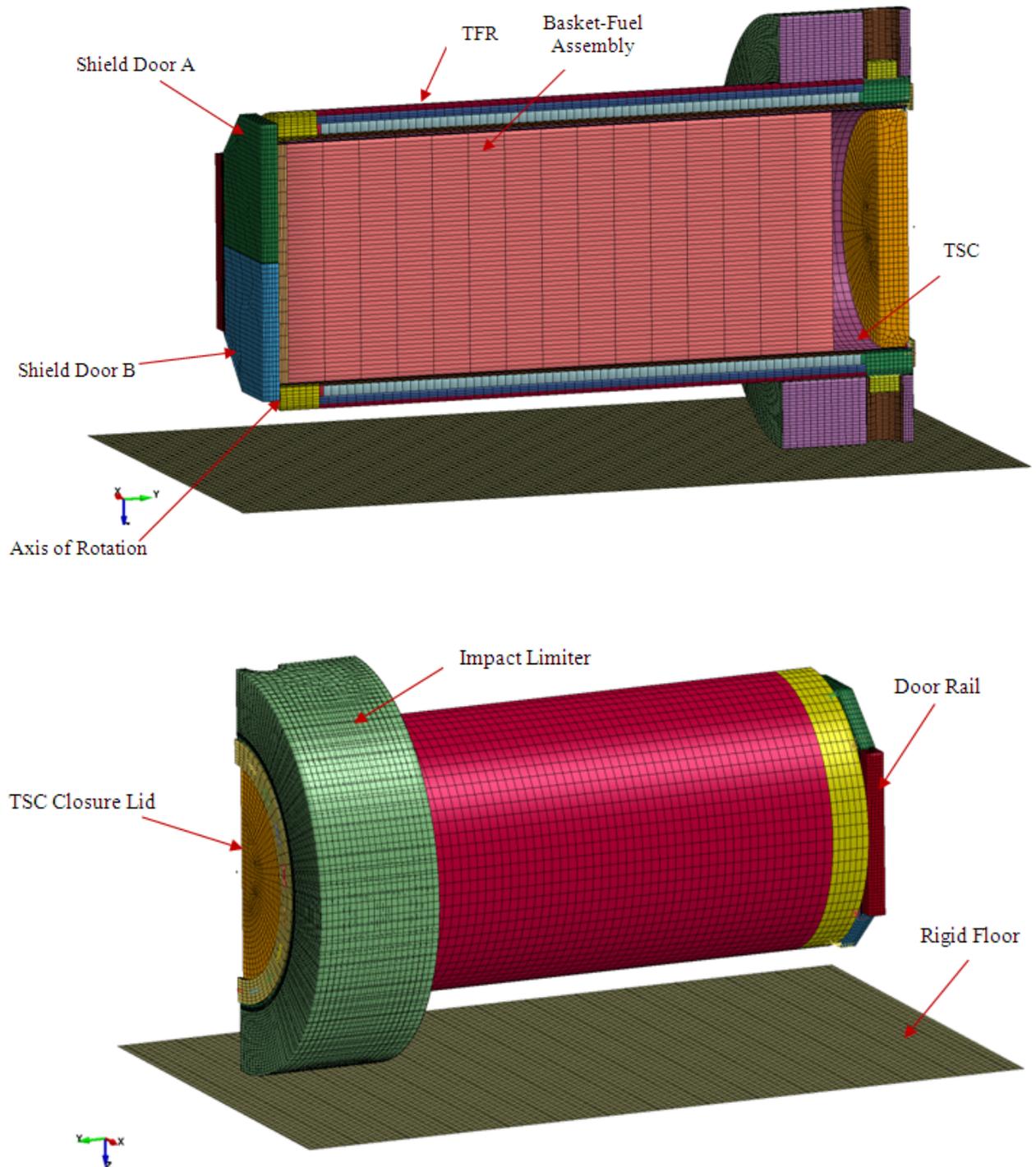


圖 6.2.A.7-4 加載時傳送護箱傾倒下之有限元素模型

8 混凝土護箱傾倒意外情況之提籃穩定度分析(斜體字部分為 NAC Proprietary Information)

此節針對假定之混凝土護箱傾倒意外，使用 LS-DYNA 建立本系統燃料提籃模型並進行分析以確認其穩定性。六.二.(六).4.(2)節已證明燃料提籃在混凝土護箱傾倒意外下，不會發生挫屈的情形，且六.二.(六).2 至六.二.(六).4 節也證實沒有其他的負載或應力足以造成本系統提籃設計的不穩定。

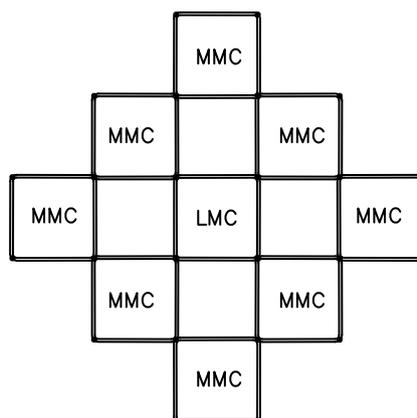
**應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。**

此局部模型保守忽略方管與支撐鉸件勁度、方管間數個定位銷、以及方管兩端聯結插銷組件等等的效應。提籃幾何穩定性驗證採用保守的局部模型，以及密封鋼筒殼體兩個軸向位置之邊界條件：一個在於密封鋼筒殼體中間部位附近，代表與提籃相互作用後之最大密封鋼筒殼體位移；以及另一個軸向位置，因較接近密封鋼筒上蓋加速度增加和密封鋼筒殼體位移減少，此分析用以驗證在密封鋼筒殼體位移邊界條件影響動態情形之敏感度分析。傾倒意外分析結果顯示，即使是使用保守模型，所有的定位銷槽仍保持銜接狀態。

傾倒意外事故分析中所使用之衝擊負載可用以決定穩定度的安全因子 (factor of safety)。意外事故期間，燃料提籃遭受側向負載，而提籃頂端之加速度如圖 6.2.6.4-3 所示(六.二.(六).4 節計算)，因為護箱以底部為基點傾倒，故提籃加速度向護箱底部單調地遞減。此分析中，使用 LS-DYNA 程式並依據圖 6.2.6.4-3 所示之加速度，並對此加速度考慮 1.5 倍的因子，進行提籃暫態分析，並顯示提籃燃料方管仍保持最初設計上的幾何配置。使用 1.5 倍的因子代表著提籃穩定性之最小安全因子大於 1.5 倍。

傾倒意外中，提籃可能受到任意角度之側向負載，故考慮提籃三個角度(0°、22.5°、45°)之傾倒分析，如圖 6.2.A.8-2 至圖 6.2.A.8-4 所示。

各方管間之間隙是影響提籃穩定性的重要因素，方管間之間隙主要由製造公差或方管真直性(straightness)所造成。一個假想的情況是相鄰方管間的最大間隙發生在於八個最大材料狀況(Maximum Material Condition, MMC)的燃料方管包圍一個最小材料狀況(Least Material Condition, LMC)之燃料方管時，如下圖所示。為了呈現此種模型，在 0° 模型之9個方管位置如圖 6.2.A.1-11 之中心線上之 2、12、23 號方管及 7、14、19 號和與其對稱的 3 個方管，將方管長寬各縮減 0.64 mm (0.025 in)，其他角度模型也考慮相同方式處理。



這種方式的方管初始位置是相互懸浮而沒有接觸的情況，但方管以水平堆疊方式組裝，因此實際上不會有這種情況發生。此外，燃料提籃頂部與底部兩端之聯結插銷組件，可使方管與方管間保持接觸並限制方管間的任意移動，因分析中忽略了聯結插銷組件的穩定效應，可視為更加保守。

**應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。**

LS-DYNA 在暫態分析中需要考慮到鉚件之厚度，因此模型內之殼元素與實體元素必須要預留間隙，而此間隙至少要為鉚件厚度的一半，而磚塊元素間的間隙不需要考慮此因素。支撐鉚件與燃料方管陣列之螺栓殼連接由磚塊元素建造，彎角支撐鉚件與側邊支撐鉚件殼之詳細模型如圖 6.2.A.8-5 和圖 6.2.A.8-6 所示。藉由殼邊上的 1.6 mm (1/16 in) 之間隙，容許支撐鉚件與燃料方管有 1.6 mm (1/16 in) 之相對位移(在殼的兩邊)。

方管在組裝完成之前，定位銷將以鉚接方式固定在方管彎角上，有限元素模型並不考慮這些鉚道。

有限元素模型也包含混凝土護箱鋼襯，以磚塊元素建造厚度為 101.6 mm(4 in)混凝土護箱鋼襯，在執行混凝土護箱傾倒意外之分析時，加速度是施加於此混凝土鋼襯之元素上。

材料性質

分析所使用之機械性質如下說明。

碳鋼燃料方管與鉸件：

燃料方管、彎角支撐鉸件與側邊支撐鉸件使用分段線性塑性模型(piecewise linear plasticity model)，提籃之最大溫度不超過 371 °C(700°F)，材料各參數如下。

燃料方管於 371 °C (SA537, Class 1, carbon steel)

降伏應力 = 2.2×10^2 MPa (32.3 ksi)

極限強度 = 4.7×10^2 MPa (68.4 ksi)

極限應變 = 21%

柏松比 = 0.31

楊氏模數 = 1.8×10^5 MPa (25.5×10^6 psi)

修正燃料方管之密度以包含中子吸收材料與保護板。

側邊與彎角鉸件於 260 °C (SA537, Class 1, carbon steel)

降伏應力 = 2.4×10^2 MPa (35.4 ksi)

極限強度 = 4.7×10^2 MPa (68.4 ksi)

極限應變 = 21%

柏松比 = 0.31

楊氏模數 = 1.9×10^5 MPa (27.3×10^6 psi)

密封鋼筒殼體 (SA240, Type 304/304L 不銹鋼)

密封鋼筒殼體使用以下 260 °C(500°F)溫度的無彈性材料(inelastic material)建構。

降伏應力 = 1.3×10^2 MPa (19.4 ksi)

極限強度 = 4.3×10^2 MPa (63.4 ksi)

柏松比 = 0.31

楊氏模數= 1.8×10^5 MPa (25.8×10^6 psi)

鋼襯 (A36 carbon steel)

鋼襯為彈性材料，其 260 °C (500°F) 之材料性質如下。

降伏應力= 2.0×10^2 MPa (29.3 ksi)

極限強度= 4.0×10^2 MPa (58.0 ksi)

柏松比 = 0.31

楊氏模數= 1.9×10^5 MPa (27.3×10^6 psi)

燃料束

燃料束為無彈性材料，材料性質如下。

降伏應力= 6.9 MPa (1 ksi)

柏松比 = 0.49

楊氏模數= 6.9×10^2 MPa (1×10^5 psi)

燃料束之密度須包含燃料束之設計重量。

邊界條件

定位銷與方管間、支撐鉸件與方管間、提籃與密封鋼筒間、以及密封鋼筒與混凝土護箱間使用自動面對面之接觸條件(automatic surface-to surface contact conditions)。對稱邊界條件施加在所有的對稱平面上，如圖 6.2.A.8-2 所示，模型之兩端之軸向面皆於以軸向位移之拘束。

以 ANSYS 分析可獲得密封鋼筒外殼的位移結果(如六.二.A.10 節密封鋼筒提籃之模型之詳細說明)，並將其施加於模型中混凝土鋼襯之內表面做為邊界條件。

對混凝土護箱鋼襯模型之節點施予加速度時間歷時條件，作為傾倒過程中燃料提籃之加速度，此加速度資料對應於密封鋼筒外殼的最大位移發生處之 1.5 倍的加速度歷時。如六.二.A.10 節敘述，此處位於密封鋼筒底部往上約 2,184 mm (86 in)。根據圖 6.2.6.4-3 之提籃頂部濾波加速度歷時(filtered acceleration time history)圖，圖 6.2.A.8-7(a) 為 2,184 mm (86 in) 處之 1.5 倍加速度歷時圖，而圖 6.2.A.8-7(b) 為 3,429 mm (135 in) 處之加速度歷時圖，此加速度用於敏感度探討。

根據傾倒意外中的混凝土護箱之角速度(如六.二.A.3.(2)節說明)的 1.5 倍及護箱相對於密封鋼筒外殼產生最大位移之位置的軸向高程，求得此初始速度 8.93 mm/s (226.8 in/s) 施加於模型所有節點上。

LS-DYNA 局部模型之保守性

- 模型忽略由提籃兩端聯結插銷組件所引起之任何拘束
- 模型忽略由方管模型範圍外之其他定位銷所提供任何拘束
- 模型考慮密封鋼筒外殼中間部位發生最大位移之邊界條件，如圖 6.2.A.10-3 所示，但大部分之提籃組件因密封鋼筒外殼之支撐而僅有很小的位移
- 局部模型忽略提籃支撐鉸件和燃料方管之勁度。
- 保守考慮在整個衝擊期間之邊界條件皆固定為密封鋼筒最大位移。因為在最大衝擊過後，密封鋼筒外殼之位移將會明顯降低。
- 密封鋼筒外殼位移之邊界條件使用保守的負載(1.36 之動態負載因子，DLF)，如六.二.A.10 節說明。

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

總結

此章節證實提籃在傾倒意外事故下，仍然保持其裝置之穩定。如先前敘述，使用 1.5 倍的負載於 LS-DYNA 穩定性分析中，並使用相同的因子於三維之密封鋼筒提籃模型，以求得 LS-DYNA 局部模型之邊界條件下的密封鋼筒外殼最大位移。模型考慮先前敘述之所有保守原則，提籃在於傾倒意外事故中，其穩定性之安全因子大於 1.5 倍，同時也大於下列敘述之容許準則 1.1。

提籃穩定性分析基於 ASME Code Subsection III, Appendix F 述敘極限載重分析之容許準則，Section F-1341.3 說明負載不應超過極限負載之 90%，因此提籃穩定性分析之最小安全因子準則為 1.1(1.0/0.9)。

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.8-1 燃料方管彎角之提籃定位銷方管槽連接(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.8-2 燃料提籃於混凝土護箱傾倒有限元素模型-0°提籃角度(NAC Proprietary Information)

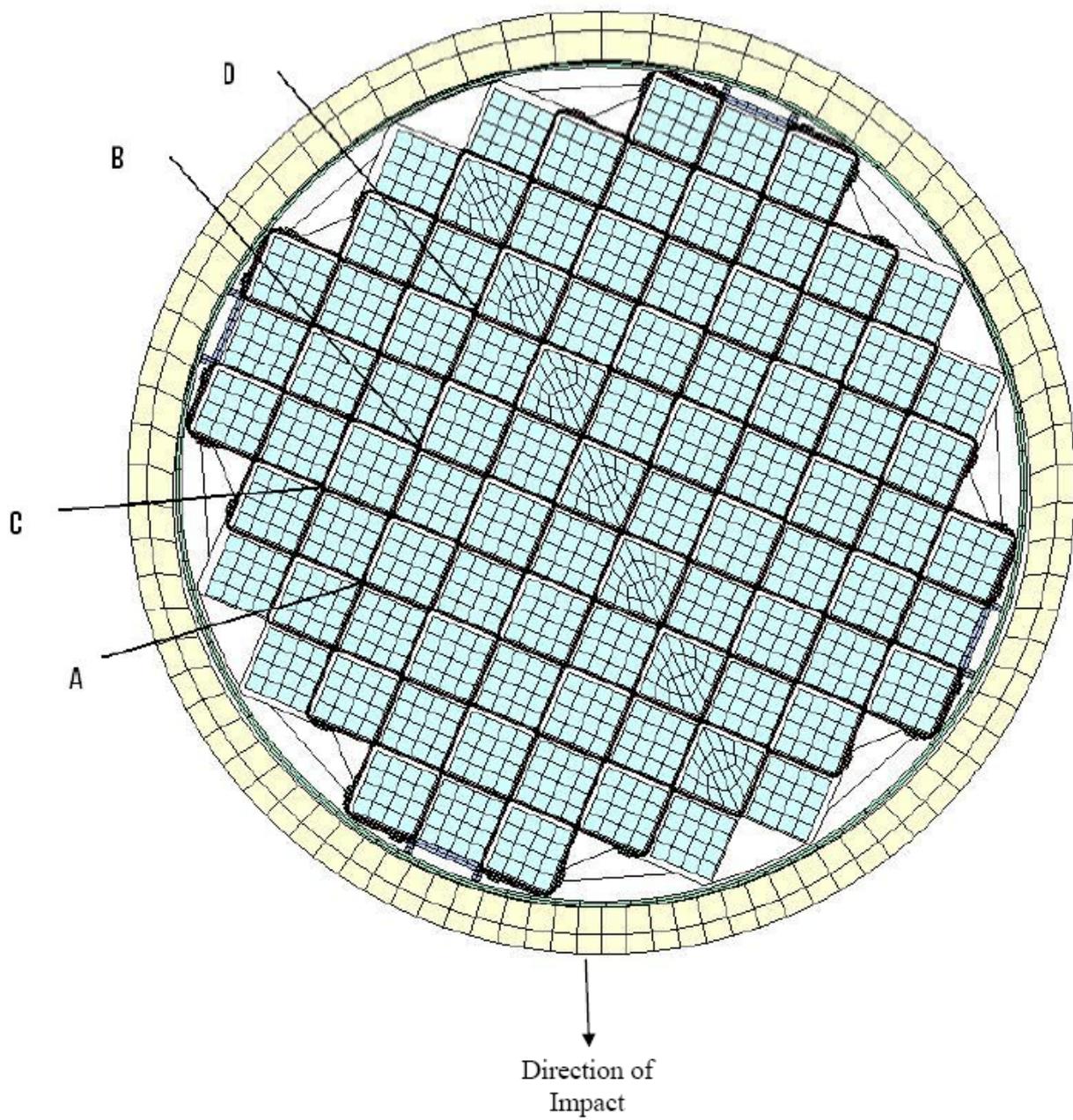


圖 6.2.A.8-3 燃料提籃於混凝土護箱傾倒有限元素模型-22.5°提籃角度

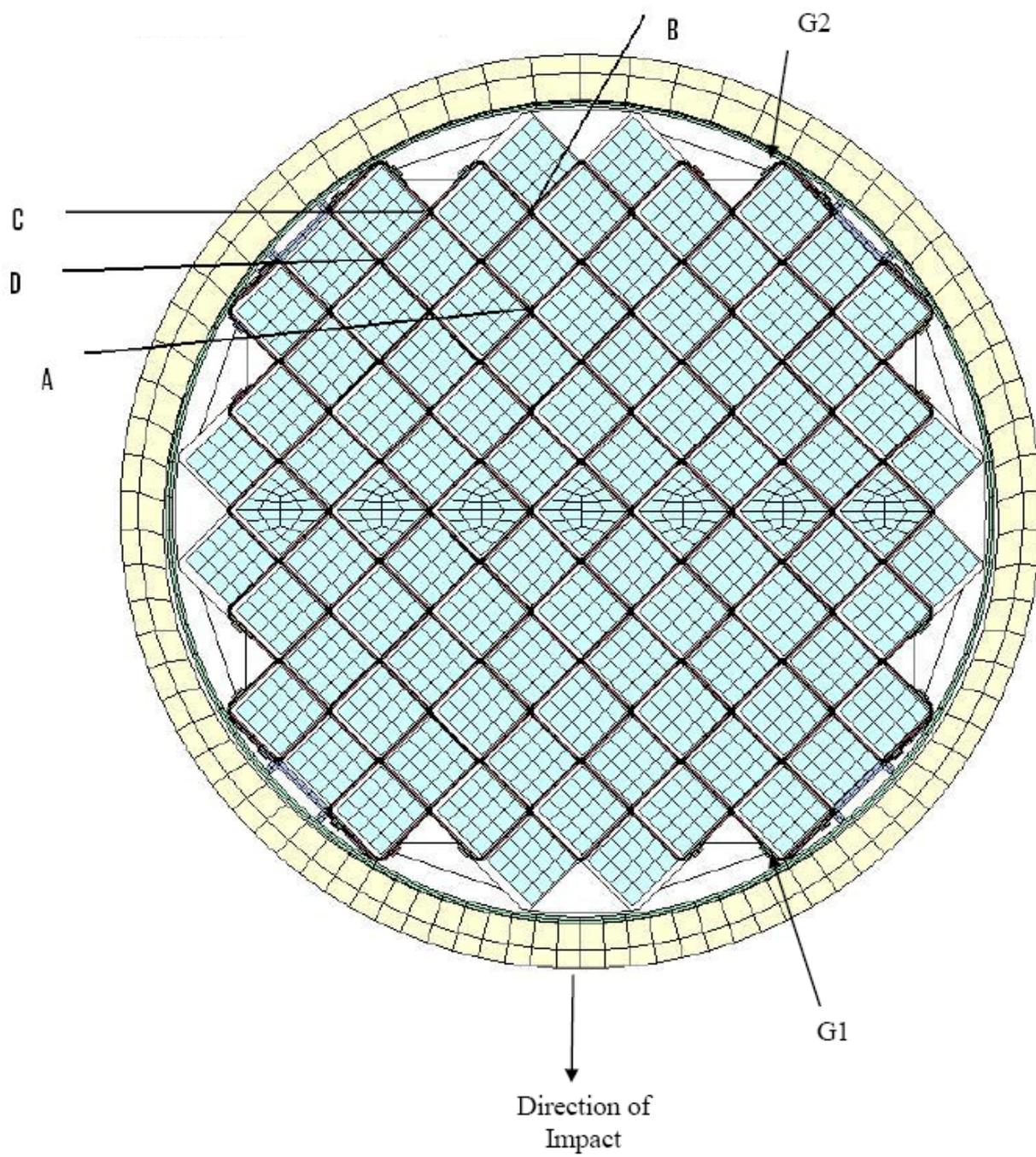


圖 6.2.A.8-4 燃料提籃於混凝土護箱傾倒有限元素模型-45°提籃角度

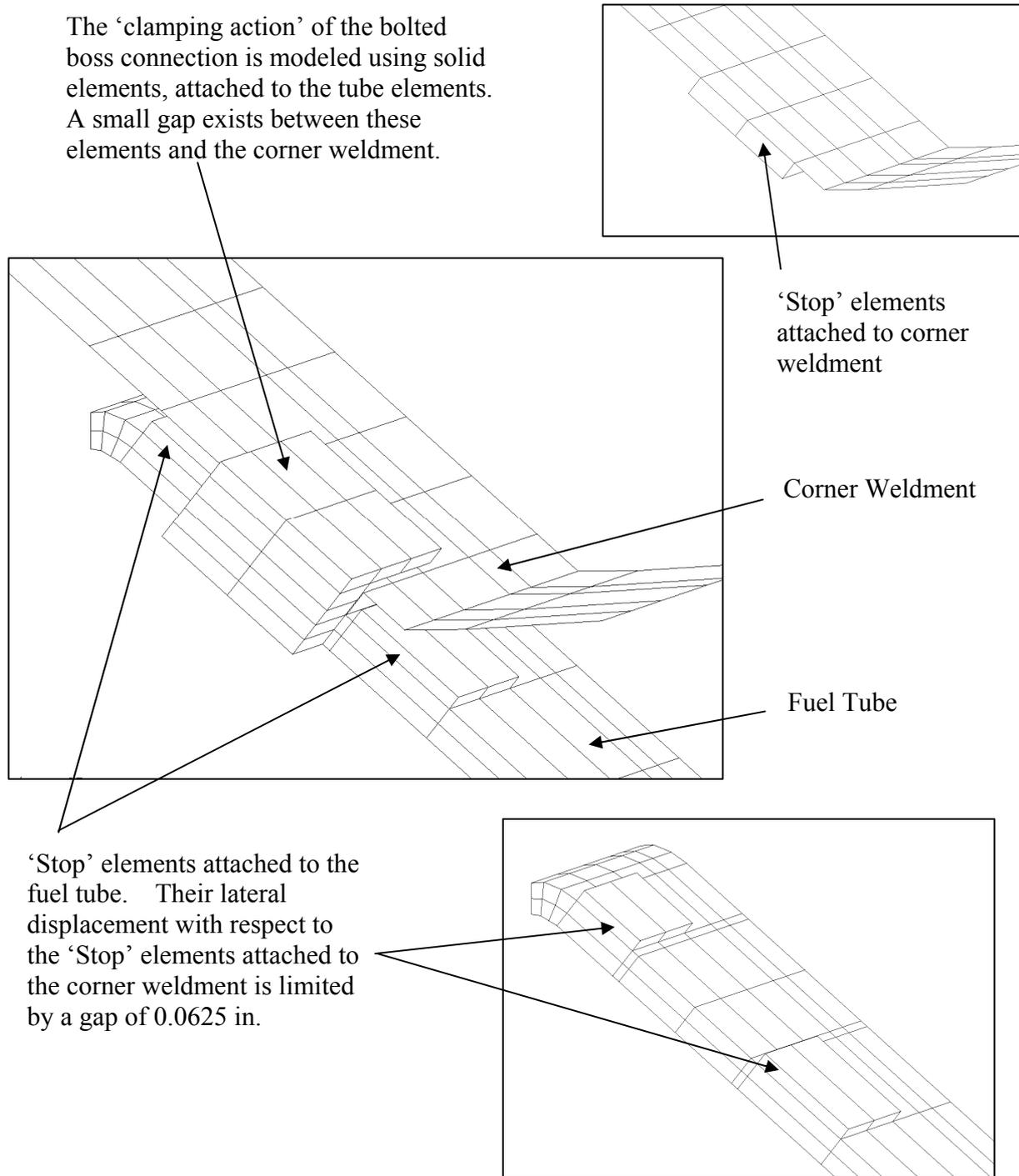
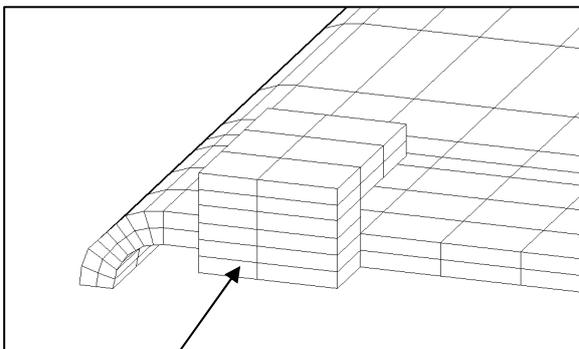
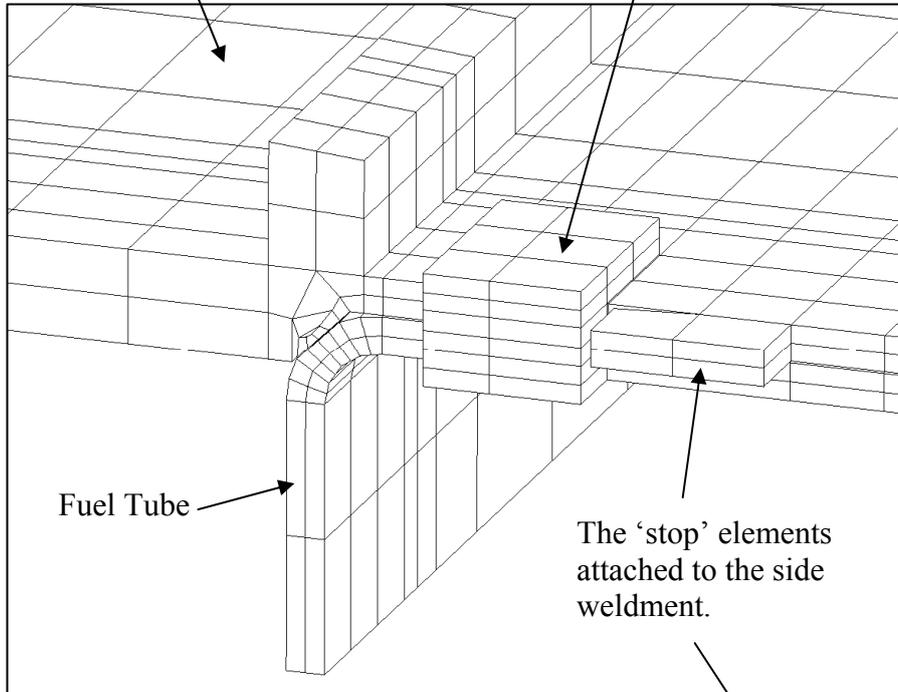


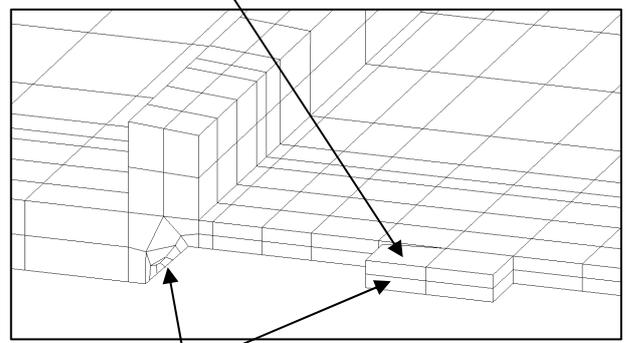
圖 6.2.A.8-5 燃料提籃有限元素模型-彎角支撐鉚件之榫連接

Side Support
Weldment

The 'clamping action' of the bolted
boss connection is modeled using solid
elements, attached to the tube elements.
A small gap exists between these
elements and the side weldment.

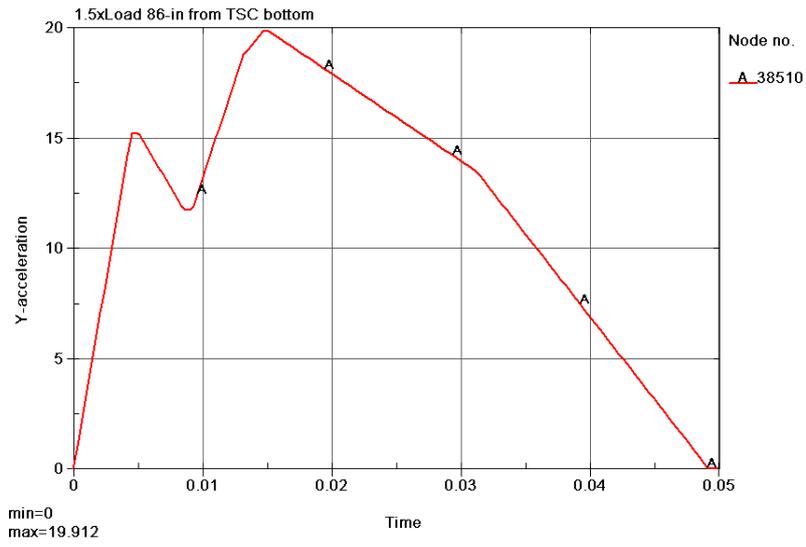


'Stop' elements attached to the fuel
tube. Their lateral displacement
with respect to the 'Stop' elements
attached to the side weldment is
limited by a gap of 0.0625 in.

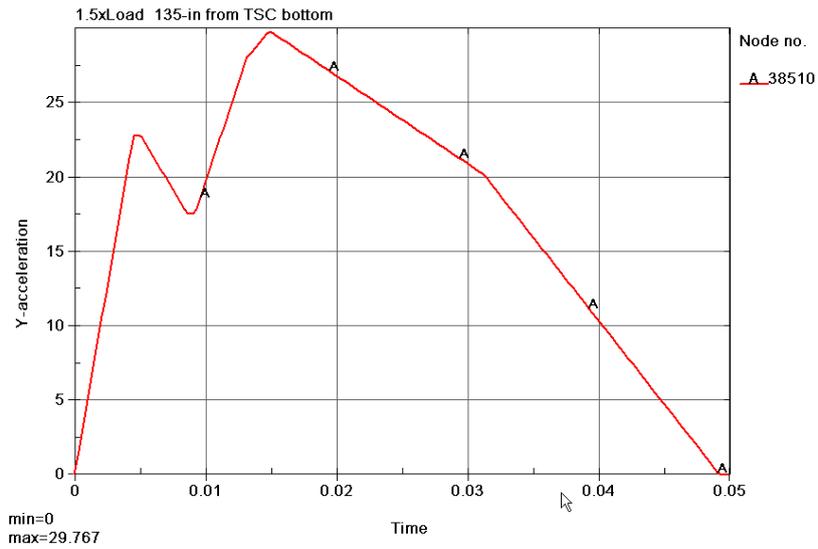


The 'stop' is modeled on one side. The
built-up edge of the side weldment acts as
a 'stop' for the other side.

圖 6.2.A.8-6 燃料提籃有限元素模型-側邊支撐鉸件之韌連接



(a) 距密封鋼筒底部 86 in 處之 1.5 倍加速度



(b) 距密封鋼筒底部 135 in 處之 1.5 倍加速度

圖 6.2.A.8-7 燃料提籃穩定性分析之加速度歷時圖

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.8-8 0°提籃角度燃料方管銷-槽連接之最大位移(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.8-9 22.5°提籃角度燃料方管銜槽連接之最大位移(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.8-10 45°提籃角度燃料方管銲-槽連接之最大位移(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.8-11 0°提籃角度燃料方管彎角最大間隙改變量之歷時圖(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.8-12 22.5°提籃角度燃料方管彎角最大間隙改變量之歷時圖(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.8-13 45°提籃角度燃料方管彎角最大間隙改變量之歷時圖(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.8-14 45°燃料提籃支撐鉚件之穀連接 G2 位置之間隙歷時圖(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

圖 6.2.A.8-15 45°燃料提籃支撐鉚件之穀連接 G1 位置之間隙歷時圖(NAC Proprietary Information)

應廠家要求：
本部分涉及廠家商業機密，屬其智慧財產權，
不予公開。

9 混凝土護箱傾倒意外之燃料方管塑性分析

此章節將說明於假定混凝土護箱傾倒意外情況下，使用 LS-DYNA 分析燃料提籃之燃料方管可能之永久變形。

模型敘述

LS-DYNA 軟體建立之三維半對稱模型如圖 6.2.A.9-1 所示，描述燃料方管之半截面之燃料方管，此半截面模型包含燃料方管以及施加燃料方管頂端位移條件之剛性塊(rigid block)。

材料性質

使用 371°C 碳鋼燃料方管之片段線性材料性質。

邊界條件

剛性塊與燃料方管頂端採用自動面對面接觸條件，燃料方管底部由剛性平面限制，對稱邊界條件施加在對稱平面上，如圖 6.2.A.9-1 所示。剛性塊以垂直位移的變化，位移時間變化圖三角形歷時。根據六.二.A.8 節 LS-DYNA 模型之計算，提籃燃料方管對角線的最大位移量為 8.6 mm (0.34 in)。位移時間為 0.045 秒，符合傾倒意外之衝擊期間，但分析時間計算至 0.06 秒，以獲得燃料方管最終之變形。

後處理

藉由圖 6.2.A.9-1 中之 A 點與 B 點，比較最終位置與最初位置的差異，以獲得燃料方管之永久變形，其 A 與 B 點對角最大永久位移為 0.1 mm (0.004 in)。

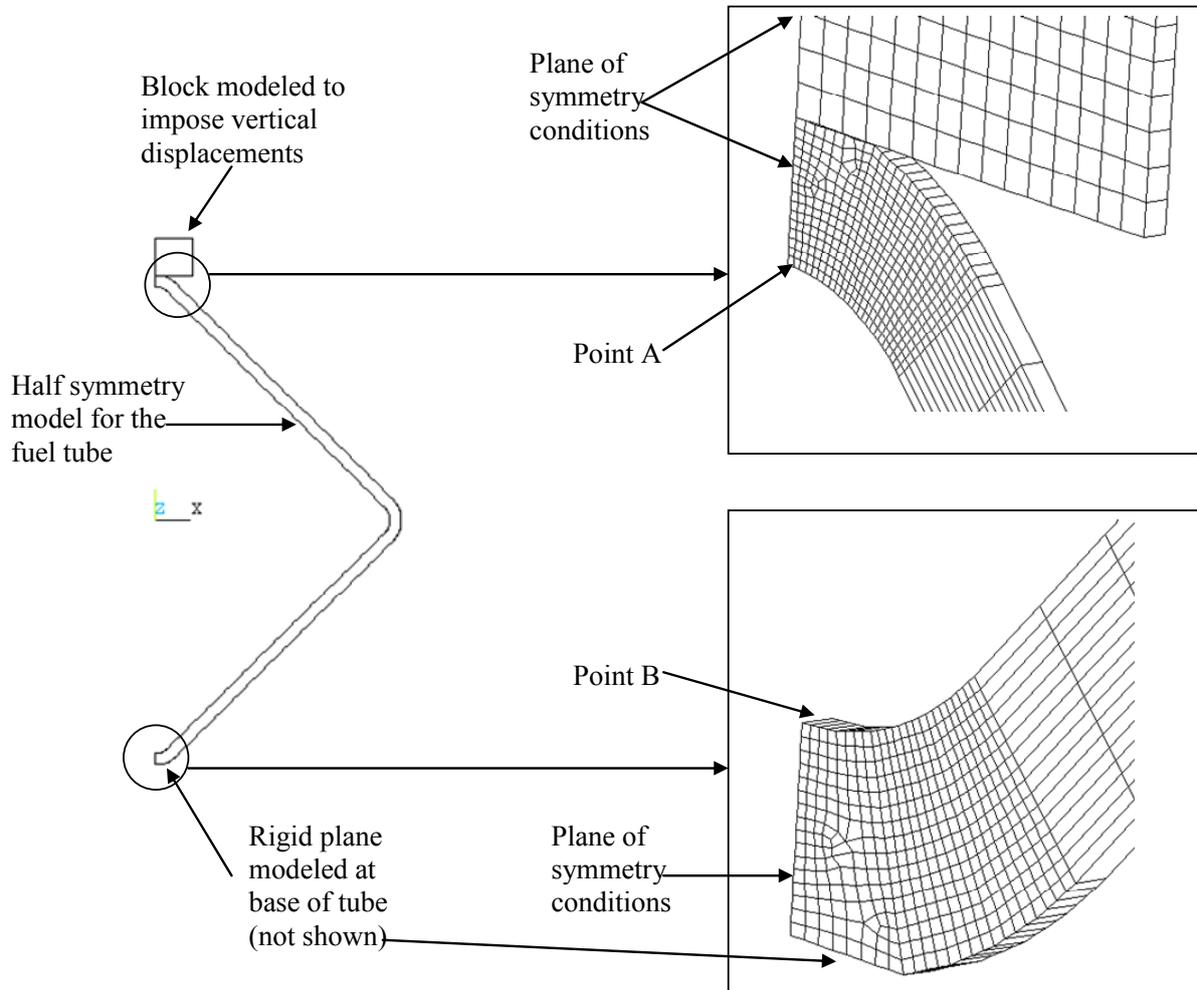


圖 6.2.A.9-1 燃料提籃燃料方管位移之有限元素模型

10 密封鋼筒提籃有限元素模型

此節將敘述密封鋼筒-提籃有限元素模型計算密封鋼筒外殼在混凝土護箱傾倒意外事故下之位移，用於 LS-DYNA 提籃穩定性分析(六.二.A.8 節)中。

為了與六.二.A.8 節之提籃穩定性分析有一致性，傾倒意外下之密封鋼筒位移仍然使用 0° 、 22.5° 、和 45° 角度。 0° 與 45° 角度使用 180° 之半對稱模型，其對稱邊界條件施加在對稱平面上，而 22.5° 角度使用 360° 之全模型。

45° 與 22.5° 模型如圖 6.2.A.10-1 與圖 6.2.A.10-2 所示，模型包含密封鋼筒殼、密封上蓋、底板、提籃燃料方管、與彎角和側邊支撐鉸件，由 ANSYS SOLID45 和 SHELL43 元素組成。側邊支撐鉸件將分為四個軸向片段，片段間之間隙為 6.3 mm，因此大幅降低支撐鉸件的剛性，增加提籃與密封鋼筒外殼的位移，為一個較保守的模型。密封鋼筒與混凝土護箱的支架間以 CONTAC52 元素建造，如圖 6.2.A.10-1 所示。支架(S 型碳鋼梁)之間隙元素勁度為 2.1×10^7 kPa，並且針對間隙勁度對密封鋼筒位移的影響，進行敏感度分析。採用一半的間隙勁度，其結果顯示密封鋼筒最大位移僅有 0.2% 的改變量。護箱傾到意外下導致密封鋼筒對支架的衝擊負載，而此負載條件將依照 NUREG/CR-6322[9] 計算支架挫屈分析。分析結果顯示，支架不會發生挫屈的情形時，有最小安全因子為 1.8。

密封鋼筒與提籃交界使用 CONTA175 與 TARGE170 元素建造，CONTA175 為三維的節點對表面之接觸元素，使用在與密封鋼筒內表面之提籃支撐鉸道相鄰的節點，TARGE170 元素使用在相對 CONTA175 元素之密封鋼筒內表面。CONTAC52 元素使用在提籃組件間的交界面，如各燃料方管之間、燃料方管與支撐鉸道之間。提籃兩端之聯結插銷組件使用 COMBIN40 元素建造，其間隙為 0.8 mm，容許方管兩端有相對的側向位移。方管間於每 508 mm 間距之定位銷亦使用 COMBIN40 元素建立。基於方管間的製造公差，容許 0.4 mm 之相對位移。支撐鉸件與燃料方管間的連接螺栓使用 LINK10 元素建造，殼使用 COMBIN40 元素建造並且在其側邊有 1.6 mm 之間隙。

0° 與 45° 模型之對稱邊界條件施加在對稱平面上，對密封鋼筒與提籃組件使用與六.二.A.1 至六.二.A.3 節相一致之材料性質做混凝土護箱傾倒意外事故分析。

模型考慮有由密封鋼筒頂部至底部逐漸變小之慣性負載，其範圍從 60g 至 1g。由圖 6.2.6.4-5 可知密封鋼筒之最大負載為 29.5g，因此本分析(60g)包含了 1.5 之負載因子與保守的動態負載因子 $1.36(60=29.5 \times 1.5 \times 1.36)$ 。

由密封鋼筒底板往上約 2,286 mm 處為密封鋼筒最大徑向位移發生處，此處剖面之最大位移如表 6.2.A.10-1 所示，同時也列出有底板往上 3,429 mm 之位移結果。圖 6.2.A.10-3 顯示 45° 提籃角度模型密封鋼筒側向之位移輪廓圖。表 6.2.A.10-1 中之位移為六.二.A.8 節提籃穩定性分析中使用的邊界條件。

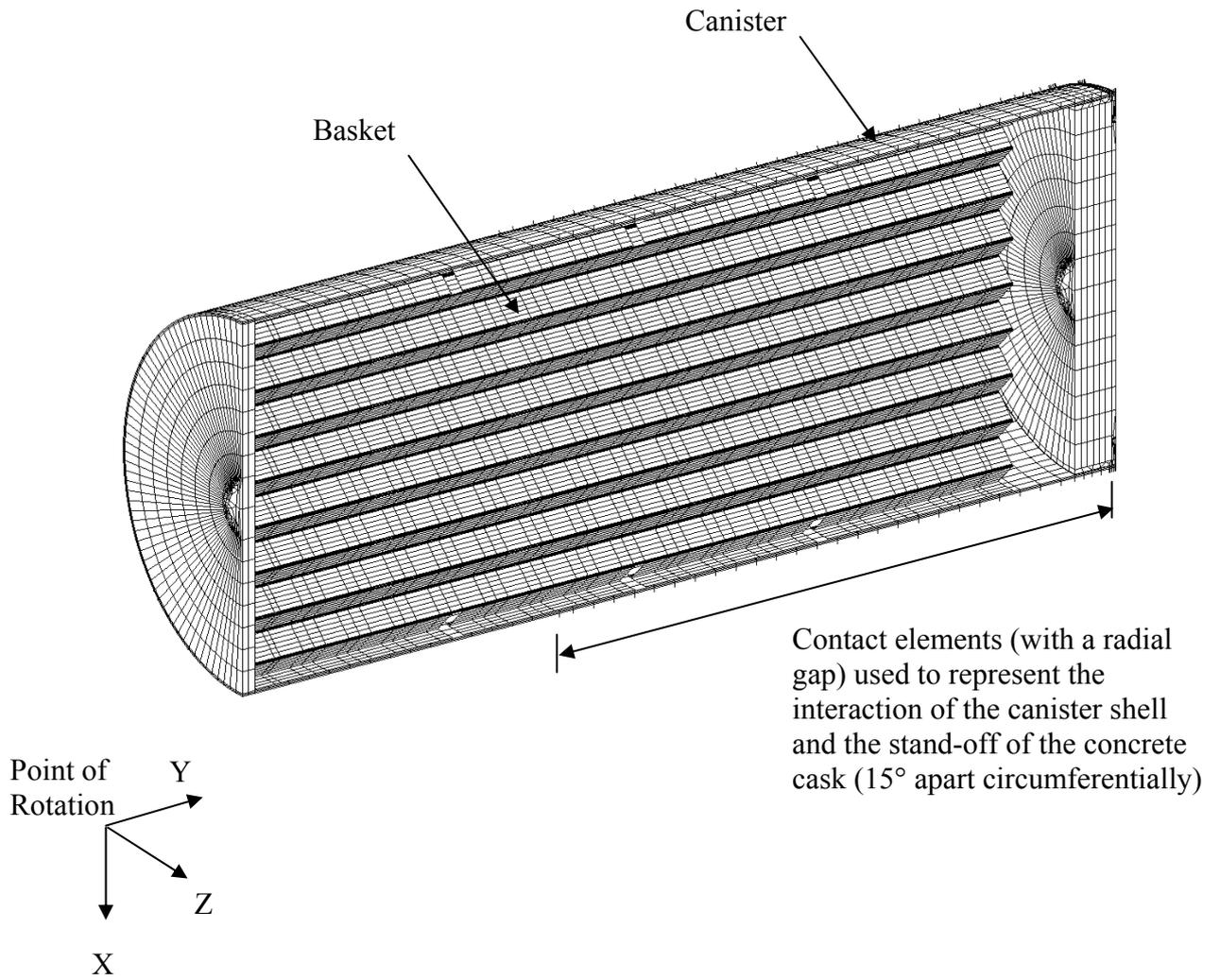
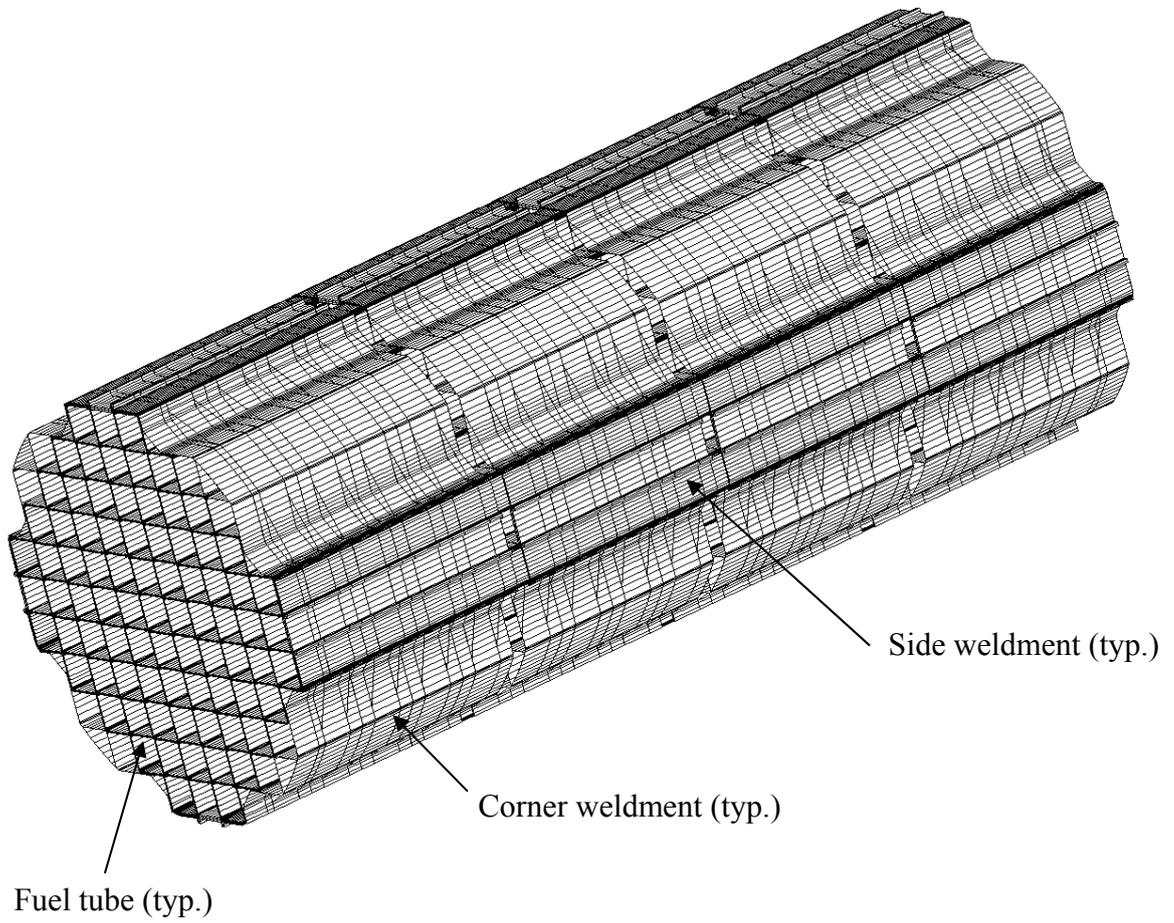


圖 6.2.A.10-1 密封鋼筒-燃料提籃有限元素模型於混凝土護箱傾倒意外-45°提籃角度



(為清楚表示，未顯示密封鋼筒)

圖 6.2.A.10-2 密封鋼筒-燃料提籃有限元素模型於混凝土護箱傾倒意外-22.5°提籃角度

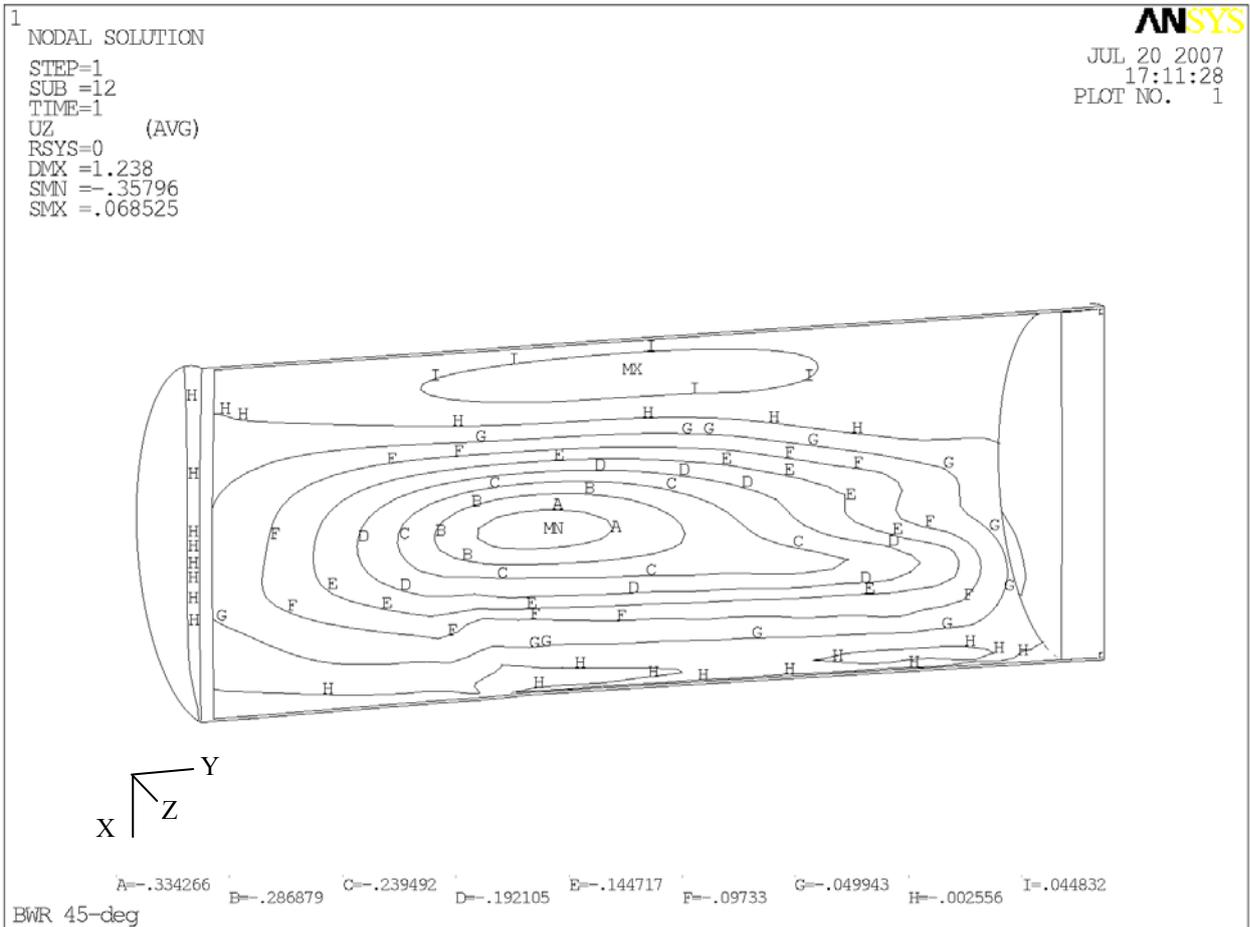


圖 6.2.A.10-3 密封鋼筒殼體側向位移圖-45°提籃角度

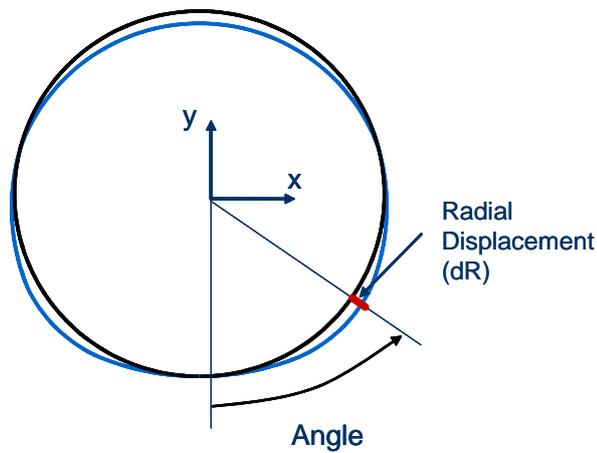
表 6.2.A.10-1 燃料提籃穩定性分析 LS-DYNA 模型之鋼筒殼體側向位移邊界條件

密封鋼筒殼體徑向位移(mm)

Basket Orientation Angle	0°	22.5°	45°	22.5° (3,429 mm)
0°	0	0	0	0
15°	0.635	1.6764	0.6096	1.9812
30°	2.3622	2.413	2.4892	2.2098
45°	5.1308	5.207	5.4102	4.3434
60°	8.6868	9.2964	9.1694	8.8646
75°	9.4488	11.2776	11.176	8.9408
90°	3.2004	7.0866	6.6294	4.4196
105°	-2.1336	1.3208	-0.7366	-0.8128
120°	-5.5118	-7.5692	-6.223	-6.3754
135°	-6.604	-9.4488	-9.0424	-6.5024
180°	-4.953	-5.6896	-7.0104	-3.9116
225°	-6.604	-8.128	-9.0424	-5.1054
240°	-5.5118	-7.239	-6.223	-4.826
255°	-2.1336	-3.302	-0.7366	-2.9972
270°	3.2004	3.6068	6.6294	0.6858
285°	9.4488	10.0584	11.176	5.7912
300°	8.6868	10.6172	9.1694	9.0678
315°	5.1308	5.5118	5.4102	5.461
330°	2.3622	3.8608	2.4892	4.0386
345°	0.7366	1.9304	0.6096	2.1336

註:

徑向位移為密封鋼筒各個截面上的最大位移。最後一欄為距離鋼筒底部 3,429 mm 高程時的鋼筒殼體位移。



11 參考文獻

1. “MAGNASTOR BWR Basket Structural Evaluation” , Calculation No. 71160-2032, NAC International.
2. “NewGen Canister Structural Analysis for Storage Condition” , Calculation No. 71160-2012.
3. “Concrete Cask Structural Evaluation” , Calculation No. 630075-2002, NAC International.
4. “MAGNASTOR Transfer Cask Structural Evaluation” , Calculation No. 71160-2008, NAC International.
5. “Soil-Structure Interaction (SSI) Analysis for the ISFSI Pad” , Calculation No., 630075-8003, NAC International.
6. “VCC Stability Analysis At The Pad” , Calculation No. 630075-2003, NAC International.
7. “TFR Tip-Over Structural Evaluation” , Calculation No. 630075-2013, NAC International.
8. “BWR Square Pin Basket Stability Evaluation for Cask Tip-Over Accident” , Calculation No. 71160-2045, NAC International.
9. NUREG/CR-6322, “Buckling Analysis of Spent Fuel Basket,” Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 1995.
10. Funk, R., "Shear Friction Transfer Mechanisms for Supports Attached to Concrete". American Concrete International Journal, Vol. 11, No.7, July 1989.