

不鏽鋼板接觸爆炸之實驗與數值模擬驗證

鄭丁興¹ 洪正偉^{2*}

¹國防大學理工學院環境資訊及工程學系

²國防大學理工學院國防科學研究所

摘 要

本研究以小藥量 TNT 炸藥，實施不鏽鋼板接觸爆炸實驗，量測爆炸後坑洞破壞範圍，採用數值模擬參數研究與實驗比較，提供較佳參數建議值。實驗方面，以 250 公克 TNT 炸藥分別與 1 公分、2 公分、5 公分等厚度之不鏽鋼板實施接觸爆炸。實驗結果顯示，不同厚度之不鏽鋼板接觸爆炸，呈現不同破壞模式。數值模擬方面，使用 LS-DYNA 軟體之 ALE 流固耦合數值模式，以及失效剪應變破壞元素侵蝕方法，模擬不鏽鋼板接觸爆炸破壞模式與範圍，模擬結果顯示，不鏽鋼板受接觸爆炸在作用後，在其失效剪應變為 0.15 時，其破壞模式及範圍與實驗結果接近。

關鍵詞：SUS304 不鏽鋼，接觸爆炸，坑洞，LS-DYNA

Validation of Experimental and Numerical Models of Stainless Steel Slabs Subjected to Contact Explosion

Ding-Shing Cheng¹ and Cheng-Wei Hung^{2*}

¹*Department of Environmental Information and Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

^{2*}*School of National Defense Science, Chung-Cheng Institute of Technology, National Defense University*

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the crater sizes of SUS304 stainless steel slabs which subjected to contact explosive loading. Both experimental and numerical methods were employed and the proposed parameters in numerical method were carried out. In experiment part, the 250g TNT rectangular explosives were detonated on stainless steel slabs with thickness of 1cm, 2 cm and 5 cm, respectively. The experiment results indicated that different failure modes were occurred when vary the thickness of the slabs. In numerical part, the arbitrary Lagrangian-Eulerian as well as the fluid-structure interaction algorithm of LS-DYNA program was used to evaluate the failure of steel slabs. An erosion criterion was employed to simulate the failure of the slabs. The numerical results showed well agreement to experiment results when the failure strain was 0.15.

Keywords: SUS304 stainless steel, contact explosion, crater, LS-DYNA

一、前言

國軍對於廢棄彈藥處理的方式，早期係採用開放式燒(爆)燬方法，其後為符合環保及工安法規要求，則改以興建焚燒爐實施火炸藥銷燬。火炸藥焚燒爐適用於彈體脫藥後之火炸藥焚燬，依種類區分為隧道窯式、流體化床式、封閉坑式以及氣幕式等焚燒爐，以隧道窯式焚燒爐，具焚燒溫度分布平均以及處理安全之特性為最佳如圖 1 所示。然國軍目前僅採用隧道窯式焚燒爐，惟處理能量亦無法滿足目前需求。為加速處理國軍廢棄彈藥，有必要增建焚燒爐之需求。惟火炸藥焚燒爐必須具備相當的剛性及強度，以承受運作時因燃燒過劇或其他意外因素產生之爆燃及爆轟。因此，爐體結構在設計建造前必須妥為評估抗炸特性。焚燒爐之爐體結構以鋼材料為主，由於鋼材料具有延展性高、抗壓(拉)強度強等優點，故其在承受爆炸作用下，可發揮材料防護性能佳之優勢。惟因鋼材料經年久使用後會產生鏽蝕等現象，造成強度明顯降低的結果，故須實行防鏽蝕之處理，以解決此問題。而不鏽鋼材料(stainless steel)有鋼材之含量，亦可防蝕，為焚燒爐主要選用的參考材料。



圖 1. 隧道窯式焚燒爐

不鏽鋼係由鐵、鉻、碳等元素所組成的合金。其中鐵是主要成分元素，鉻是最主要的合金元素。一般而言，鉻含量至少要占 11% 才能稱為不鏽鋼，因為如果鉻含量不足，則不鏽鋼外表將無法形成那層緻密的氧化鉻保護膜，而失去防鏽的功能。本研究將探討沃斯田鐵系(austenite)之 SUS304 不鏽鋼。其標準成分是 18% 鉻加 8% 鎳，即一般所稱的 18-8 不鏽鋼，

為最常使用之不鏽鋼材料。其優點為具有優良耐蝕性與耐久性、良好的加工性、耐高溫及耐火性、良好的機械性質、美觀與衛生、綠色產品等。然不鏽鋼製品的材料成本雖為碳鋼的 5 至 10 倍，但若以壽期成本的觀點來看，不鏽鋼產品是 100% 可以回收再利用，即使已到壽期，仍有剩餘價值。對於以不鏽鋼材料之爆炸相關文獻，2004 年 Louca 等 [1] 與 Boh 等 [2] 利用 2 種不同不鏽鋼材料與 3 種不同斷面之異形板(Profined panels)，運用於防爆擋牆之削減爆炸波之單自由度理論與數值模擬驗證，提出彈塑性範圍的設計規範。2005 年 Langdon 等 [3-5]，分別以實驗、理論與數值模擬，分析不鏽鋼板防爆擋牆承受爆炸波與衝量作用下之變形與破壞，並強調防爆牆設計時應考量承受方向與支撐系統。2007 年 Schleyer 等 [6]，再利用 1/4 縮尺之不鏽鋼板作為防爆牆，探討經由震波管(shock tube)所產生之爆炸波作用於板的反應，量測其反射壓力(reflected pressure)與連接系統對整體防爆擋產生之結果。儘管目前在國際上發表之爆炸實驗文章有許多，但在國內爆炸實驗仍受到管制。近年來由於電腦硬體的提升與數值模擬技術的精進，在爆炸力學的領域中，為降低爆炸實驗成本與限制，利用電腦數值模擬爆炸所產生流體與固體交互作用之現象，並預測在爆炸作用後固體所產生破壞現象，已是目前研究發展趨勢 [7-13]。本研究利用 LS-DYNA 軟體中之 ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian) 流固耦合數值模式，配合不鏽鋼板爆炸實驗之結果相互比較，驗證流固耦合數值模型之合理性，期能提供不鏽鋼材料抗爆設計之參考依據。

二、研究內容及方法

本研究主要採爆炸實驗與數值模擬相互驗證。以小藥量 TNT 炸藥，針對 SUS304 不鏽鋼板(以下簡稱不鏽鋼板)實施接觸爆炸，量測不鏽鋼板產生之坑洞範圍尺寸，並配合數值模擬參數研究結果，驗證數值模型之合理性。實驗方面，以 250 公克之 TNT 炸藥分別與 1 公分、2 公分、5 公分之 3 種不同厚度 SUS304 不鏽鋼板實施接觸爆炸，探討不鏽鋼板坑洞破壞範圍大小。數值模擬方面，使用 LS-DYNA 軟體之 ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian) 流固耦合數值模式，模擬

不鏽鋼板接處爆炸破壞範圍。首先模擬 2 公分不鏽鋼板接觸爆炸，搭配失效剪應變破壞 (shear strain at failure) 元素侵蝕參數研究，模擬結果與實驗量測坑洞破壞範圍結果相比較，決定較佳參數。其次，將 2 公分數值模型較佳參數建議值之結果，建立 1 公分與 5 公分不鏽鋼板接觸爆炸數值模型，模擬坑洞破壞範圍，並與實驗相比較，驗證其參數合理性。最後探討不同 TNT 炸藥形狀、炸藥量對不鏽鋼板接觸爆炸後鋼板坑洞大小與破壞模式分析。以下分別就實驗配置、LS-DYNA 程式之流固耦合理論、數值模型建構、材料組成律、元素侵蝕參數設定，網格收斂分析等，說明如下。

2.1 不鏽鋼板接觸爆炸實驗

不鏽鋼板接觸爆炸實驗配置，如圖 2 所示。實驗時將不鏽鋼板固定設置於鋼質支撐架上，並將 250 公克 TNT 炸藥與電雷管接續後置於不鏽鋼板中央位置。

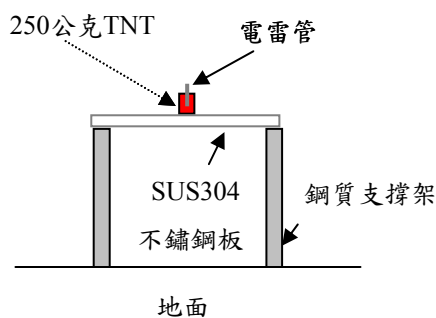


圖 2. SUS304 不鏽鋼板爆炸實驗配置

不鏽鋼板試體長度與寬度均為 50 公分，厚度分別為 1 公分、2 公分與 5 公分，每種厚度各 3 塊，共計 9 塊不鏽鋼板試體。3 種不同厚度之不鏽鋼板實驗設置情形，如圖 3 所示。本研究使用之 TNT 炸藥採熔鑄方式施作。製作完成之炸藥尺寸為 5.35 公分之立方體，TNT 炸藥之裝藥密度為 1.63g/cm^3 ，炸藥爆速為 6930m/s 。電雷管採用國造 10 號電雷管，為無延時之瞬發引爆電雷管。為避免脫落，電雷管與 TNT 炸藥之接續係以膠帶固定，並將電雷管頂部位於 TNT 炸藥中心處，置於不鏽鋼板中央上方。電雷管上裝有腳線，設置時需先進行導通測試，以利檢查確定引爆作業。爆炸後不鏽鋼板坑洞破壞範圍之量測工具。為日本三

豐(mitutoyo)公司 500-196 遊標卡尺，精確度為 2mm，量測爆炸後不鏽鋼板破壞長度與深度。



圖 3. 不同厚度之不鏽鋼板設置情形：(a)1 公分；(b) 2 公分；(c)5 公分

2.2 不鏽鋼板接觸爆炸數值模擬驗證

2.2.1 LS-DYNA 程式流固耦合理論

對於流體動力學與非線性的固體力學數值模擬，最重要的關鍵在於選定何種數值模式，使在連續體變形時，對所劃分的有限元網格一旦發生巨大的扭曲變形，仍能精確的提供正確的材料介面(material Interfaces)及移動的邊界(Mobile Boundaries)，以對連續體的動態行為進行描述 [14]。常見的數值模式有 Lagrangian 描述法、Eulerian 描述法與 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian) 描述法等 3 種描述法，如圖 4 所示。其中 ALE 描述法兼具 Lagrangian 及 Eulerian 兩種描述法的特點，可比 Lagrangian 系統能克服網格元素變形過大時導致數值計算困難而停止運算問題，可

有效的控制及追蹤結構邊界的運動行為。另亦較 Eulerian 系統有較好之計算精確度。因此 ALE 描述法首先會執行一個或數個 Lagrangian 網格計算，此時的網格元素會隨著材料的流動而產生變形，隨後才執行 ALE 時步(time step)計算，可區分 smooth step 及 advection step 等 2 個階段，smooth step 為保持變形後之物體邊界條件，對內部進行重分網格，網格擴展關係保持不變，advection step 為將變形網格中的元素變量（密度、能量及應力張量等）和節點速度輸入到重新劃分的網格中。

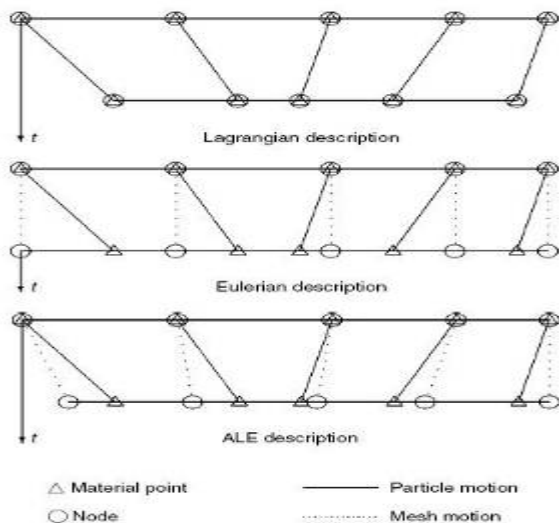


圖 4. Lagrangian、Eulerian 及 ALE 描述法[14]

在流固耦合分析中建立模型時，流體網格與固體網格是分開建立的，流體網格與固體網格在耦合方面是採用了網格重疊(overlap)的方式建立，且文獻[15, 16]對於流體網格與固體網格的大小有建議值，其中固體網格大小為流體網格的 2 倍為較佳之網格配置，如圖 5 所示。

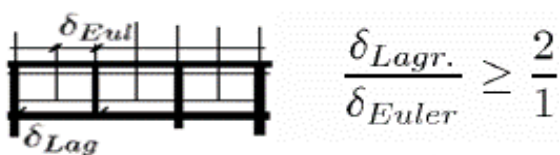


圖 5. Lagrangian 與 Eulerian 網格比例[15]

2.2.2 數值模型

由於對稱簡化模型可以縮短程式計算時間以及降低資料存取量，故本文採用 1/4 對稱簡化模型進行分析，如圖 6 所示。本流固耦合數值模型建立區分為不鏽鋼板、炸藥及空氣。其中不鏽鋼板部分，其長×寬尺寸均為 25 公分×25 公分，厚度則區分為 1 公分、2 公分、5 公分等 3 種。空氣與炸藥部分，利用 LS-DYNA 程式中 initial_volume_fraction_geometry 以及搭配 initial_detonation 等設定，在空氣網格範圍內給定立方體炸藥形狀與炸藥起爆點座標位置。空氣體積尺寸為 6 公分×6 公分×12 公分、TNT 炸藥尺寸為 2.677 公分×2.677 公分×5.353 公分。

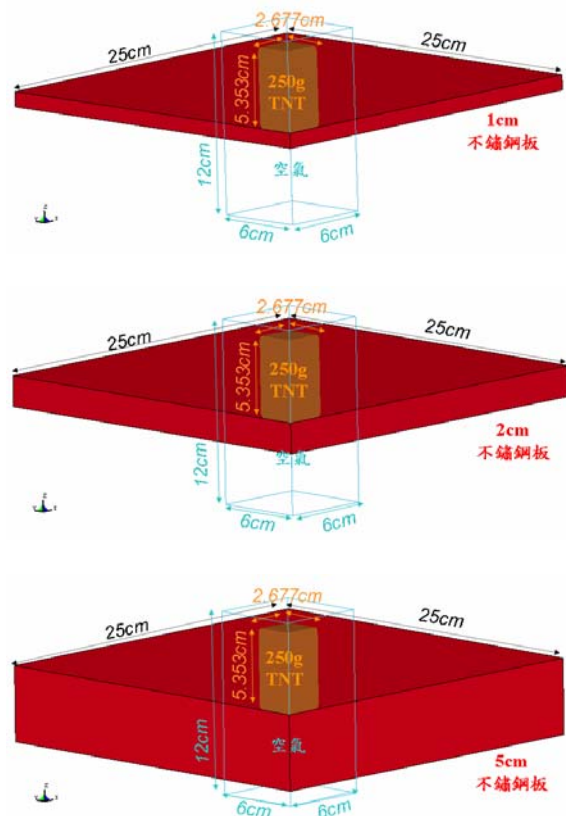


圖 6. 不鏽鋼板接觸爆炸數值模型

數值模型元素形式使用 LS-DYNA 程式之實體元素 (solid element)，如圖 7 所示。其中空氣及炸藥透過 LS-DYNA 程式 ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP 之設定為多物質 ALE 網格描述，元素計算方式採用多

物質耦合元素中心單點積分(one point ALE multi-material element) 算法，不鏽鋼板使用定義為 Lagrangian 網格描述，元素計算方式則採用常應力實體元素(constant stress solid element)算法，本研究數值模型中採用固體網格大小為流體網格的 2 倍，且與流體網格重疊。固體網格為 0.5 公分，流體網格為 0.25 公分。數值模型有限元素使用量，1 公分不鏽鋼板為 32648，2 公分不鏽鋼板為 37648，5 公分不鏽鋼板為 52648。LS-DYNA 程式 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 的設定，將多物質 ALE 網格定義為 master ID，Lagrangian 網格設定為 slave ID，產生 ALE 流固耦合之數值模式，並將 TNT 炸藥之起爆點設定在 TNT 炸藥中心點。

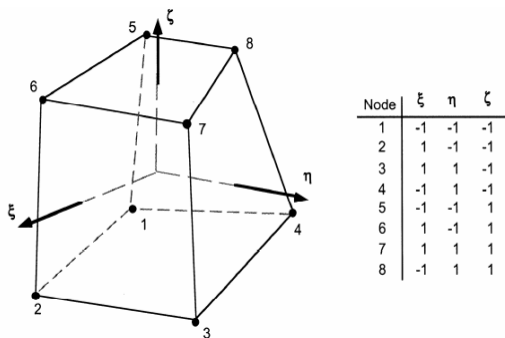


圖 7. 實體元素[17]

2.2.3 材料組成律

材料在承受爆炸荷載作用時，為描述其承受爆炸衝擊波的反應，需搭配使用狀態方程式(equation of state)來描述材料的壓力與體積變化關係。有關一般常用的材料參數方面，可參考 LS-DYNA 程式用戶手冊中 MAT 參數來設定。而本研究中所用的材料模式共有炸藥(MAT8)，空氣(MAT9)，不鏽鋼(MAT15)等 3 種材料，其材料參數以及所搭配之狀態方程式，如表 1 與表 2 所示，分別說明如下。

(1) 空氣

空氣材料是使用 LS-DYNA 程式中編號 9 號的 MAT_NULL 材料模式，其所需輸入參數值中，RO 為材料的質量密度(mass density)、PC 為壓力截斷值(pressure cutoff)、MU 為動態黏滯係數(dynamic viscosity coefficient)、

TEROD 為張力侵蝕相對體積(relative volume for erosion in tension)、CEROD 為壓力侵蝕相對體積(relative volume for erosion in compression)、YM 為楊氏係數(young's modulus)、PR 為柏松比(poisson's ratio)，並搭配 LS-DYNA 程式中編號 1 號的 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 之線性多項式狀態方程式。

$$P=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E_0 \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\rho_{current}}{\rho_{initial}} - 1 \quad (2)$$

此狀態方程式是由單位參考比容初始內能 E_0 (initial internal energy per unit reference specific volume)、空氣密度變化 μ 以及使用者需自行定義的參數 C_i ($i=0\sim 6$) 組成。假設氣體為理想氣體時，可將 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_6 設置為零，並令 $C_4=C_5$ 等於 $\gamma-1$ ，如此狀態方程式可簡化如下。

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho_{current}}{\rho_{initial}} E_0 \quad (3)$$

$$E_0 = e \rho_{initial} \quad (4)$$

其中 $\rho_{initial}$ 為空氣密度的初始值(initial density)， $\rho_{current}$ 為目前的空氣密度值(current density)， e 為空氣內能。

(2) 炸藥

炸藥材料係採用 LS-DYNA 程式中編號 8 號之 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 的材料模式，可用來模擬高爆能量炸藥。所需之參數係參考 LLNL[18]爆炸手冊，其中 RO 為材料的質量密度(mass density)、D 為炸藥的爆速(detonation velocity)、PCJ 為 CJ 壓力值(chapman-jouget pressure)、BETA 為衰變常數(beta burn flag)、K 為體積模數(bulk modulus)、G 為剪力模數(shear modulus)、SIGY 為降伏應力(yield stress)。並搭配 LS-DYNA 程式中編號 2 號的 JWL 狀態方程式。

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V_r}\right)e^{-R_1V_r}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V_r}\right)e^{-R_2V_r}+\frac{\omega E_0}{V_r} \quad (5)$$

其中，A、B、R1、R2、 ω 、 λ 等參數皆為方程式係數，P 為壓力，Vr 為相對體積 (initial relative volume)，Eo 為初始的能量密度(initial internal energy per unit reference specific volume)。

(3)不鏽鋼

不鏽鋼採用 LS-DYNA 程式中編號 15 號之 MAT_JOHNSON_COOK 材料，所需輸入材料參數值中 RO 為材料的質量密度(mass density)、G 為剪力模數(shear modulus)、E 為楊氏係數(young's modulus)、PR 為柏松比(poisson's ratio)、DTF 為元素刪除最小時步(minimum time step size for automatic element deletion)、VP 為應變率效應公式(formulation for rate effects)、A, B, C, N 為方程式輸入常數(input constants)、TM 為熔點溫度(melt temperature)、TR 為室溫(room temperature)、EPSO 為擬靜態應變率界限(quasi-static threshold strain rate)、CP 為比熱(specific heat)、PC 為破壞應力或壓力終止(failure stress or pressure cutoff)、SPALL 為疤落破壞型式(spall type)、IT 為重複塑性應變設定(plastic strain iteration option)、D1-D5 為破壞參數(failure parameters)、C2/P 為應變參數設定(optional strain-rate parameter)。並搭配 LS-DYNA 程式中編號 4 號的 EOS_GRUNEISEN 狀態方程式。

$$P=\frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2}) \mu - \frac{a}{2} \mu^2]}{[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (6)$$

其中 C 為衝擊波速度 μ_s 與質點速度 μ_p 曲線截距， γ_0 是 Gruneisen γ ，a 是對 γ_0 的一階體積修正， S_1 、 S_2 、 S_3 是 $\mu_s - \mu_p$ 曲線方程式的係數。

表1. 空氣、炸藥材料參數值

材料暨狀態方程式輸入值 (單位= g, cm, μ second, Mbar)									
*MAT_NULL (空氣) [16]									
RO	PC	MU	TEROD	CEROD	YM	PR			
1.29E-03	0	0	0	0	0	0			
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL (空氣狀態方程式) [16]									
Co	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Eo	V0	
0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5E-06	1	
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN (炸藥) [18]									
RO	D	PCJ	BETA	K	G	SIGY			
1.63	0.69	0.21	0	0	0	0			
*EOS_JWL (炸藥狀態方程式) [18]									
A	B	R1	R2	Ω	Eo	Vo			
3.71	0.032	4.15	0.95	0.30	0.07	1.00			

表2. 不鏽鋼材料參數值

材料暨狀態方程式輸入值 (單位= g, cm, μ second, Mbar)								
*MAT_JOHNSON_COOK (不鏽鋼) [19, 20]								
RO	G	E	PR	DTF	VP	RATEOP		
7.90	0.77	-	-	-	-	-		
A	B	N	C	M	TM	TR	EPSO	
5.1E-03	5.1E-03	0.26	0.14E-01	1.03	2380	298	1E-06	
CP	PC	SPALL	IT	D1	D2	D3	D4	
4.23E-06	-9.00E+00	3.00	0	5.00	0	0	0	
D5	C2/P	-	-	-	-	-	-	
0	0	-	-	-	-	-	-	
*EOS_GRUNEISEN (不鏽鋼狀態方程式) [20]								
C	S1	S2	S3	GAMAO	A	E0		
0.46	1.49	0	0	1.93	0.50	0		
VO	-	-	-	-	-	-		
1	-	-	-	-	-	-		

2.2.4 元素侵蝕參數設定

在 LS-DYNA 程式中，元素侵蝕參數 (MAT_ADD_EROSION) 設定，主要為程式提供一種外加元素失效的破壞準則，以壓力、應力與應變為元素失效破壞判斷的依據。每個元素侵蝕準則都是各自獨立的，一旦其中任何一個元素失效破壞準則條件成立，元素即從程式計算中被刪除。2002 年 Leppänen 與 Gylltoft [21] 提到，較常用的失效破壞準則即是失效應變破壞，亦即在數值模擬程式計算中，當物體元素的變形量已經達到所設定的失效應變破壞準則時，該元素即被移除且元素質量亦被拋棄在元素的節點角落，當一個節點所有連結的元素全部失效後，則該節點在有限元計算模型中將被刪除。本研究考慮的元素失效破壞準則，係參考 2009 年 Cheng 與 Hung[22] 所提，在接觸爆炸中，材料之坑洞破壞現象係以失效剪應變破壞 (shear strain at failure) 為主要控制參數。故本文使用 LS-DYNA 程式中之失效剪應變破壞參數 (以 EPSSH 代稱)，作為後續不鏽鋼板接觸爆炸數值模擬元素侵蝕研究探討之參數。首先模擬 2 公分不鏽鋼板接觸爆炸，搭配失效剪應變破壞元素侵蝕參數研究，模擬結果與實驗量測坑洞破壞範圍結果相比較，決定較佳參數。2 公分不鏽鋼板接觸爆炸數值模擬元素侵蝕參數研究矩陣，如表 3 所示。

表 3. 元素侵蝕參數研究矩陣

編號	失效剪應變參數值 (EPSSH)	編號	失效剪應變參數值 (EPSSH)
1	0.10	10	0.19
2	0.11	11	0.20
3	0.12	12	0.30
4	0.13	13	0.40
5	0.14	14	0.50
6	0.15	15	0.60
7	0.16	16	0.70
8	0.17	17	0.80
9	0.18	-	-

2.3 不鏽鋼板接觸爆炸預測數值模擬

本節利用 2 公分不鏽鋼板接觸爆炸實驗，與數值模擬驗證後之較佳參數建議值，針對 (1) 250 公克 TNT 球形炸藥、(2) 125 公克 TNT 立方體炸藥及 (3) 500 公克 TNT 立方體炸藥分別與 1 公分、2 公分、5 公分不鏽鋼板，建立不鏽鋼板接觸爆炸預測數值模型，探討不同 TNT 炸藥形狀、炸藥量與不鏽鋼板坑洞大小破壞關係。研究矩陣如表 4 所示。

表 4. 不鏽鋼板接觸爆炸預測數值模擬研究矩陣

編號	TNT 炸藥形狀	TNT 炸藥重量 (公克)	不鏽鋼板厚度 (公分)
18	球形	250	1
19		250	2
20		250	5
21	立方體	125	1
22		125	2
23		125	5
24		500	1
25		500	2
26		500	5
27		250	1
28		250	5

三、結果與討論

3.1 不鏽鋼板接觸爆炸實驗結果

以 250 公克立方體 TNT 炸藥對 1 公分、2 公分、5 公分等 3 種不同厚度之不鏽鋼板接觸爆炸實驗結果，呈現不同的破壞現象，如圖 8 所示。在 250 公克立方體 TNT 炸藥接觸爆炸作用下，1 公分不鏽鋼板產生貫穿 (perforation) 破壞，在 2 公分不鏽鋼板部分則產生正面凹陷變形 (deformation) 未貫穿與背面疤落 (spalling) 破壞現象，在 5 公分不鏽鋼板部分則產生正面變形與背面輕微凸起等破壞現象。

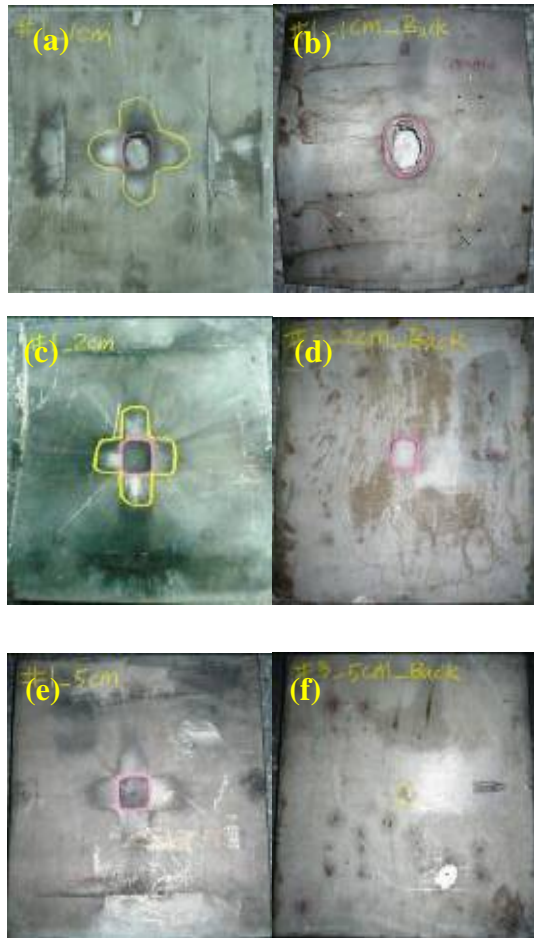


圖 8. 不鏽鋼板承受 250 公克立方體 TNT 炸藥接觸爆炸後之破壞情形：(a)1 公分正面；(b)1 公分背面；(c)2 公分正面；(d)2 公分背面；(e)5 公分正面；(f)5 公分背面

運用游標卡尺量測不鏽鋼板接觸爆炸破壞尺寸，如表 5 所示。在不鏽鋼板正面部分，1 公分不鏽鋼板平均破壞長度為 6.09 公分、2 公分不鏽鋼板平均破壞長度為 5.52 公分、5 公分不鏽鋼板平均破壞長度為 5.76 公分，顯示不鏽鋼板若呈現貫穿破壞時，正面平均破壞長度較大於正面凹洞變形未貫穿破壞。但不鏽鋼板若僅呈現正面凹洞變形未貫穿破壞時，正面平均破壞長度則隨不鏽鋼板厚度增加而增加。另在不鏽鋼板破壞深度方面，1 公分不鏽鋼板呈現貫穿破壞、2 公分不鏽鋼板平均破壞深度為 1.61 公分、5 公分不鏽鋼板平均破壞深度為 0.55 公分，顯示不論何種形式破壞，當隨不鏽鋼板厚度增加時，其破壞深度有減少之趨勢。而在不鏽鋼板背面部分，1 公分不鏽鋼板平均破壞長度為 7.02 公分、2 公分不鏽鋼板

平均破壞長度為 4.51 公分、5 公分不鏽鋼板則無坑洞破壞，僅輕微凸起，顯示不鏽鋼板隨厚度增加，背面坑洞破壞範圍有減少趨勢。

表 5. 不鏽鋼板承受 250 公克立方體 TNT 炸藥接觸爆炸後破壞尺寸實驗結果

Experiment	正面			背面	
	水平破壞 (公分)	縱向破壞 (公分)	深度 (公分)	水平破壞 (公分)	縱向破壞 (公分)
1 公分	6.10	6.11	貫穿	7.02	7.05
	6.03	6.10	貫穿	7.03	6.95
	6.02	6.18	貫穿	7.05	7.03
平均值	6.09		貫穿	7.02	
2 公分	5.62	5.49	1.61	4.60	4.90
	5.56	5.46	1.55	4.56	4.55
	5.52	5.44	1.66	4.45	4.00
平均值	5.52		1.61	4.51	
5 公分	5.78	5.69	0.57	4.02*	3.85*
	5.95	5.68	0.54	4.01*	3.75*
	5.78	5.69	0.55	3.99*	3.88*
平均值	5.76		0.55	3.92*	

*：表示不鏽鋼板凸起尺寸

3.2 不鏽鋼板接觸爆炸數值模擬驗證結果

3.2.1 元素侵蝕參數設定結果

2 公分不鏽鋼板接觸爆炸數值模擬坑洞破壞結果與實驗之比較，如表 6 所示。數值模擬結果顯示，當失效剪應變破壞 (EPSSH) 值為 0.15 時，不鏽鋼板平均破壞長度與實驗值較接近，其中在正面平均破壞長度方面，數值模擬值與實驗值比較誤差為 4.53%。在背面方面，數值模擬值與實驗值比較，平均破壞長度誤差為 0.79%，在破壞深度方面，數值模擬值與實驗值比較誤差為 -6.23%，故此結果可適當模擬不鏽鋼板接觸破壞範圍。

表 6. 2 公分不鏽鋼板承受 250 公克立方體 TNT 炸藥接觸爆炸後破壞尺寸模擬結果

編號	失效剪應變 (EPSSH)	正面平均破壞長度 (公分)	正面誤差 (%)	背面平均破壞長度 (公分)	背面誤差 (%)	破壞深度 (公分)	誤差 (%)	備註
1	0.1	5.98	8.42	5.29	17.23	2.00	24.56	1
2	0.11	5.89	6.76	5.35	18.71	2.00	24.56	1
3	0.12	5.80	5.21	5.41	19.89	2.00	24.56	1
4	0.13	3.96	-28.19	5.24	16.27	2.00	24.56	1
5	0.14	5.75	4.21	5.54	22.84	1.56	-2.66	2
6	0.15	5.76	4.53	4.55	0.79	1.51	-6.23	2
7	0.16	5.76	4.51	3.50	-22.36	1.47	-8.16	2
8	0.17	5.77	4.54	3.48	-22.85	1.46	-8.91	2
9	0.18	5.77	4.58	3.45	-23.57	1.45	-9.99	2
10	0.19	5.77	4.62	2.37	-47.43	1.31	-18.39	2
11	0.2	5.77	4.64	2.34	-48.10	1.30	-19.26	2
12	0.3	5.77	4.68	6.41	42.21	1.28	-20.38	3
13	0.4	5.77	4.68	6.41	42.21	1.28	-20.38	3
14	0.5	5.77	4.68	6.41	42.21	1.28	-20.38	3
15	0.6	5.77	4.68	6.41	42.21	1.28	-20.38	3
16	0.7	5.77	4.68	6.41	42.21	1.28	-20.38	3
17	0.8	5.77	4.68	6.41	42.21	1.28	-20.38	3

備註: 1:貫穿破壞, 2:正面凹陷變形、背面凸起變形, 3:正面凹陷變形、背面凸起變形。

3.2.3 1 公分與 5 公分不鏽鋼板數值模型比較

本節依據 2 公分不鏽鋼板數值模擬結果之元素侵蝕參數建議值, 建立 1 公分與 5 公分不鏽鋼板數值模型, 並與實驗結果比較, 驗證元素侵蝕參數適用性, 如表 7 所示。在 1 公分不鏽鋼板部分, 正面平均破壞長度誤差為 1.72%。背面平均破壞長度誤差為 3.93%。另在 5 公分不鏽鋼板部分, 正面平均破壞長度誤差為 5.71%, 背面平均破壞長度誤差為 3.31%。而破壞深度誤差為-6.02%。顯示失效剪應變破壞參數值為 0.15 時, 可有效運用在不鏽鋼板接觸爆炸正面、背面平均破壞長度與破壞深度之預測。

表 7. 1 公分與 5 公分不鏽鋼板承受 250 公克立方體 TNT 炸藥接觸爆炸後之數值模擬結果

編號	鋼板厚度 (公分)	失效剪應變參數值 (EPSSH)	正面平均破壞長度 (公分)	正面誤差 (%)	背面平均破壞長度 (公分)	背面誤差 (%)	破壞深度 (公分)	誤差 (%)	備註
27	1	0.15	6.19	1.72	7.30	3.93	1.00	0.00	1
28	5	0.15	6.09	5.71	4.05	3.31	0.52	-6.02	2

備註: 1:貫穿破壞, 2:正面凹陷變形、背面凸起變形。

3.3 不鏽鋼板接觸爆炸數值模擬預測結果

3.3.1 炸藥形狀與不鏽鋼板坑洞大小破壞

以 250 公克球形 TNT 炸藥與 1 公分、2 公分、5 公分不鏽鋼板接觸爆炸, 研究球形炸藥與立方體炸藥形狀對於不鏽鋼板坑洞大小破壞, 如表 8 所示。由於球形炸藥與不鏽鋼板接觸面較小, 故破壞範圍均小於立方體炸藥接觸爆炸破壞範圍, 在正面平均破壞長度、背面平均破壞長度、破壞深度方面, 球形炸藥約為立方體炸藥的一半。

表 8. 不鏽鋼板承受 250 公克球形、立方體 TNT 炸藥接觸爆炸破壞尺寸模擬結果

編號	TNT 炸藥形狀	TNT 炸藥重量 (公克)	不鏽鋼板厚度 (公分)	正面平均破壞長度 (公分)	背面平均破壞長度 (公分)	破壞深度 (公分)
18	球形	250	1	2.16	3.45	1.00
27	立方體	250	1	6.19	7.30	1.00
誤差 (%)				-65.13	-52.73	0
19	球形	250	2	3	3.09	0.79
6	立方體	250	2	5.76	4.55	1.51
誤差 (%)				-47.96	-32.02	-47.53
20	球形	250	5	3.07	0	0.26
28	立方體	250	5	6.09	4.05	0.52
誤差 (%)				-49.59	100	-50.00

3.3.2 炸藥量與不鏽鋼板坑洞破壞關係

以 125、250 與 500 公克等不同立方體 TNT 炸藥，分別與 1 公分、2 公分與 5 公分等厚度之不鏽鋼板，實施接觸爆炸數值模擬，其目的在討論增加 TNT 炸藥量對不鏽鋼板坑洞破壞範圍之影響，數值模擬結果如表 9 所示。在 1 公分不鏽鋼板部分，正面平均破壞長度由 4.91 公分增加至 7.47 公分，背面平均破壞長度由 5.85 公分增加至 8.54 公分，破壞深度均呈現貫穿破壞。在 2 公分不鏽鋼板部分，正面平均破壞長度由 4.94 公分增加至 6.82 公分，背面平均破壞長度由 3.22 公分增加至 7.10 公分，破壞深度則由 0.52 公分增加至 2 公分之貫穿破壞。在 5 公分不鏽鋼板部分，正面平均破壞長度由 5.07 公分增加至 8.07 公分，背面平均破壞長度由 0 公分增加至 6.12 公分，破壞深度則由 0.33 公分增加至 0.67 公分之凹陷破壞。研究結果顯示，在 3 種不同厚度之不鏽鋼板接觸爆炸，增加炸藥量，其不鏽鋼板正面平均破壞長度、背面平均破壞長度與破壞深度均呈現增加趨勢。亦即增加炸藥量對破壞範圍有明顯之影響。

表 9. 不鏽鋼板承受不同藥量 TNT 炸藥接觸爆炸後尺寸模擬結果

編號	TNT 炸藥 形狀	TNT 炸藥 重量 (公克)	不鏽 鋼板 厚度 (公分)	正面平 均破壞 長度 (公分)	背面平 均破壞 長度 (公分)	破壞 深度 (公分)
21	立方體	125	1	4.91	5.85	1.00
27		250		6.19	7.30	1.00
24		500		7.47	8.54	1.00
22		125	2	4.94	3.22	0.52
6		250		5.76	4.55	1.51
25		500		6.82	7.10	2.00
23		125	5	5.07	0.00	0.33
28		250		6.09	4.05	0.52
26		500		8.07	6.12	0.67

四、結 論

本文以小藥量 TNT 炸藥，針對不鏽鋼板實施接觸爆炸實驗，量測坑洞破壞範圍並與數值模擬比較。研究成果說明如下：在接觸爆炸實驗部分，3 種不同厚度不鏽鋼板呈現不同的破壞結果，1 公分不鏽鋼板產生貫穿(perforation)破壞，而 2 公分不鏽鋼板部分產生正面凹陷變形 (deformation)未貫穿與背面疤落(spalling) 破壞現象，在 5 公分不鏽鋼板部分則產生正面凹陷變形與背面輕微凸起等破壞現象。數值模擬方面，以失效剪應變破壞應變值 0.15 為適用之參數建議值，不鏽鋼板之正面、背面平均破壞直徑與平均破壞深度與實驗比較，誤差分別在 6.9%、3.93%、6.23%以內。本文之數值模擬預測方式可作為不鏽鋼材料運用於軍事工程設計之參考。

致 謝

感謝國防部、台超科技股份有限公司、國防大學葉早發教授、李金樹助理教授等提供相關實驗支援，另感謝中科院沈柏成博士提供寶貴意見。

參考文獻

- [1] Louca, L. A., Boh, J. W., and Choo, Y. S., "Design and Analysis of Stainless Steel Profiled Blast Barriers," J. Constructional Steel Research, Vol. 60, pp. 1699-1723, 2004.
- [2] Boh, J. W., Louca, L. A., and Choo, Y. S., "Numerical Assessment of Explosion Resistant Profiled Blast Barriers," J. Marine Structures, Vol. 17, pp. 139-160, 2004.
- [3] Langdon, G. S. and Schleyer, G. K., "Inelastic Deformation and Failure of Profiled Stainless Steel Blast Wall Panels. Part I : Experimental Investigations," Int. J. Impact Engineering, Vol. 31, pp. 341-369, 2005.
- [4] Langdon, G. S. and Schleyer, G. K., "Inelastic Deformation and Failure of Profiled Stainless Steel Blast Wall Panels. Part II : Analytical Modelling Considerations," Int. J. Impact Engineering, Vol. 31, pp. 371-399, 2005.

- [5] Langdon, G. S. and Schleyer, G. K., "Inelastic Deformation and Failure of Profiled Stainless Steel Blast Wall Panels. Part III: Finite Element Simulation and Overall Summary," *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 988-1012, 2006.
- [6] Schleyer, G. K., Lowak, M. J., Polcyn, G. S., and Langdon, G. S., "Experimental Investigation of Blast Wall Panels under Shock Pressure Loading," *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 1095-1118, 2007.
- [7] Cheng, D. S., Chiu, S. C., and Hung, C. W., "Validation of Fluid Structure Interaction Models of Reinforced Concrete Structures Subjected to Internal Explosion," 3rd Int. Conf. Design and Analysis of Protective Structures, Singapore, pp. 155-164, 2010.
- [8] Cheng, D. S., Chang, J. L., Chung C. N., and Hung, C. W., "Effect of Erosion Value of Strain on Crater Size of Reinforced Concrete Plates Subjected to Shaped Charge," 3rd Int. Conf. Design and Analysis of Protective Structures, Singapore, pp. 194-200, 2010.
- [9] Chen, H. C., Hung, C. W., and Yu, W. F., "Validation of Fluid Structure Interaction Models of Magazines Subjected to Internal Explosion," 8th Int. Conf. Shock & Impact Loads on Structures, Australia, pp. 189-197, 2009.
- [10] Lai, H. H., Chiu, S. C., Cheng, D. S., and Hung, C. W., "Effect of Steel, CFRP and GFRP-Retrofitted Plate on Crater of Reinforced Concrete Subjected to Contact Explosion," 8th Int. Conf. Shock & Impact Loads on Structures, Australia, pp. 363-370, 2009.
- [11] Hung, C. W., Yu, W. F., and Cheng, D. S., "A Parametric Study of Explosion Simulation for Reinforced Concrete Slab Subjected to a Rectangular Explosive," Int. Symp. Interaction of the Effects of Munitions with Structures 12.1, USA, 2007.
- [12] Yu, W. f., Hung, C. W., and Cheng, D. S., "Effect of Subdividing Stacks on Blast Overpressure from Explosion Inside Ammunition Storage Magazine," *J. Explosives and Propellants*, Vol. 24, No. 2, pp. 25-40, 2008.
- [13] Yu, W. f., Hung, C. W., and Cheng, D. S., "Effect of Blast wall on Safety Distance of Ammunition Storage Magazine Subjected to Internal Explosion," *J. Chung Cheng Institute of Technology*, Vol. 39-2, pp. 131-146, 2010.
- [14] Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J.-Ph., and Rodríguez-Ferran, A., The Encyclopedia of Computational Mechanics, Wiley, Vol. 1, Chap. 14, pp. 413-437, 2004.
- [15] Gebbeken, N. and Ruppert, M., "On the Safety and Reliability of High Dynamic Hydrocode Simulations," *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, Vol.46, No.6, pp. 839-851, 1999.
- [16] Mullin, M. J. and O'Toole, B. J., "Simulation of Energy Absorbing Materials in Blast Loaded Structures," 8th Int. LS-DYNA Users Conf., Michigan, pp. 67-80, 2004.
- [17] Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, pp. 3.2, 2006.
- [18] Dobratz, B. M., LLNL Explosives Handbook Properties of Chemical Explosives and Explosives Simulants, Lawrence Livermore National Laboratory, pp. 8-23, 1981.
- [19] Tounsi, N., Vincenti, J., Otho, A., and Elbestawi, E. A., "From the Basic Mechanics of Orthogonal Metal Cutting toward the Identification of the Constitutive Equation," *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, pp. 1373-1383, 2002.
- [20] Steninberg, D. J., Equation of State and Strength Properties of Selected Materials, Lawrence Livermore National Laboratory, pp. 35, 1991.
- [21] Leppänen, J. and Gylltoft, K., "Finite Element Analyses of Concrete Penetration with a Steel Projectile. Comparison of Lagrangian and Eulerian Techniques," 7th Int. Symp. Structures under Shock and Impact, pp. 59-68, 2002.
- [22] Cheng, D. S. and Hung, C. W., "A Numerical Model and Associated Parametric Study for Concrete Slabs Subject to Contact Explosion," *J. Explosives and Propellants*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-20, 2009.

