

鋼筋混凝土板承受矩形炸藥爆炸數值模擬研究

作者/洪正偉 少校 陳祺杰 上尉

提要

近年來隨著電腦的普及發展，很多研發機構與企業為了減少大量的研究時間與經費，已逐漸利用數值模擬技術，代替傳統實驗所需付出的大量成本。

本研究主要在利用 LS-DYNA 有限元素分析軟體中之 ALE 流固耦合數值模式，探討鋼筋混凝土板承受矩形炸藥接觸爆炸後之坑洞大小，並進行參數研究，以期能提供國軍未來設計階段的參考依據。鋼筋與混凝土採用 Lagrangian 網格，而炸藥與空氣採用 Eulerian 網格。

首先建立矩形 TNT 炸藥自由場爆炸及地表爆炸數值模型，並與美軍技術手冊 TM5-1300 比較，探討矩形炸藥數值模型爆炸後所產生之爆壓與衝量是否合理。同時研究近距離爆炸之收斂性分析，並探討溫度效應對於爆壓與衝量之影響。研究發現在自由場爆炸中，藉由在炸藥周邊空氣元素初始溫度提升至 3000K 時，入射爆壓及衝量在 $0.4\text{m/kg}^{1/3} \sim 0.8\text{m/kg}^{1/3}$ 範圍內，與 TM5-1300 爆壓及衝量之對數誤差值在 5% 以內，但在 $Z < 0.4\text{m/kg}^{1/3}$ 之近距離爆炸，溫度提升對爆壓及衝量的提升效果並不明顯。

在鋼筋混凝土板接觸爆炸部分，以元素侵蝕效應中之剪應變及主應變為主要參數，探討混凝土板爆炸後坑洞及疤落現象。研究發現剪應變侵蝕為影響鋼筋混凝土板破壞之主要控制因素，隨著失效剪應變值增加，其鋼筋混凝土板正面平均破壞直徑有減少之趨勢，而背面破壞之平均直徑有增加之趨勢。

關鍵詞：鋼筋混凝土板、爆炸

壹、前言

目前國軍最常使用的爆破炸藥種類如 TNT、C4、特出特（Tetrytol）等，其形狀大都為矩形，而軍事設施，則主要以鋼筋混凝土材料為主，因為其成本低廉、易於施工、可塑性高、耐火及抗壓能力強，但其抗拉強度卻偏低。

因此，在爆壓作用下，除炸藥附近產生坑洞外，在混凝土板背面，由於爆壓反射後產生拉應力，造成疤落現象。近年來由於個人電腦的普及化與有限元素分析軟體的快速發展，在大量節省人力與財力的前提下，利用電腦輔助分析軟體從事數值模擬的研究已是發展的趨勢。

Akers 與 Phillips^[1] (2004) 利用 Zapotec 軟體結合 CTH 與 Pronto3D 等數值模式方法，進行純混凝土板接觸爆炸試驗與數值模擬。首先將尺寸為 2m×2m×0.2m 之純混凝土板，利用重量在 0.15~0.44kg 之不同型式的 C4 炸藥置於板之表面中央處，進行 6 個純混凝土板接觸爆炸試驗，其實驗配置如圖 1.1 所示。

Akers, et al.^[2] (2005) 也同樣利用修正的 Zapotec、CTH 與 Pronto3D 軟體，模擬鋼筋混凝土板接觸爆炸試驗，以一個 1.25 磅 C4 矩形炸藥，探討鋼筋混凝土板接觸爆炸後的破壞形式，其鋼筋混凝土板模型尺寸與實驗配置如圖 1.2 所示。

本文主要目的在於探討鋼筋混凝土板在承受矩形炸藥接觸爆炸後的破壞現象數值模式是否合理，將建構一個鋼筋混凝土板數值模型，使其與炸藥及空氣共構一個流固耦合的數值模式，並與相關文獻之實驗數據及經驗公式相比較，以驗證數值模式之可行性，並期望能提供軍事防護工程設計之參考。

註¹：Akers, S. A. and Phillips, B. R., “Concrete Modeled as an Inhomogeneous Material: Numerical Simulations of Contact Detonation Charges,” 18th Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation conference, Germany, 2004.

註²：Akers, S. A., Weed, R., Rickman, D., and Danielson, K., “Improving Explosive Wall Breaching: An Experimental and Numerical Program”, HPC users group conference, USA, 2005.

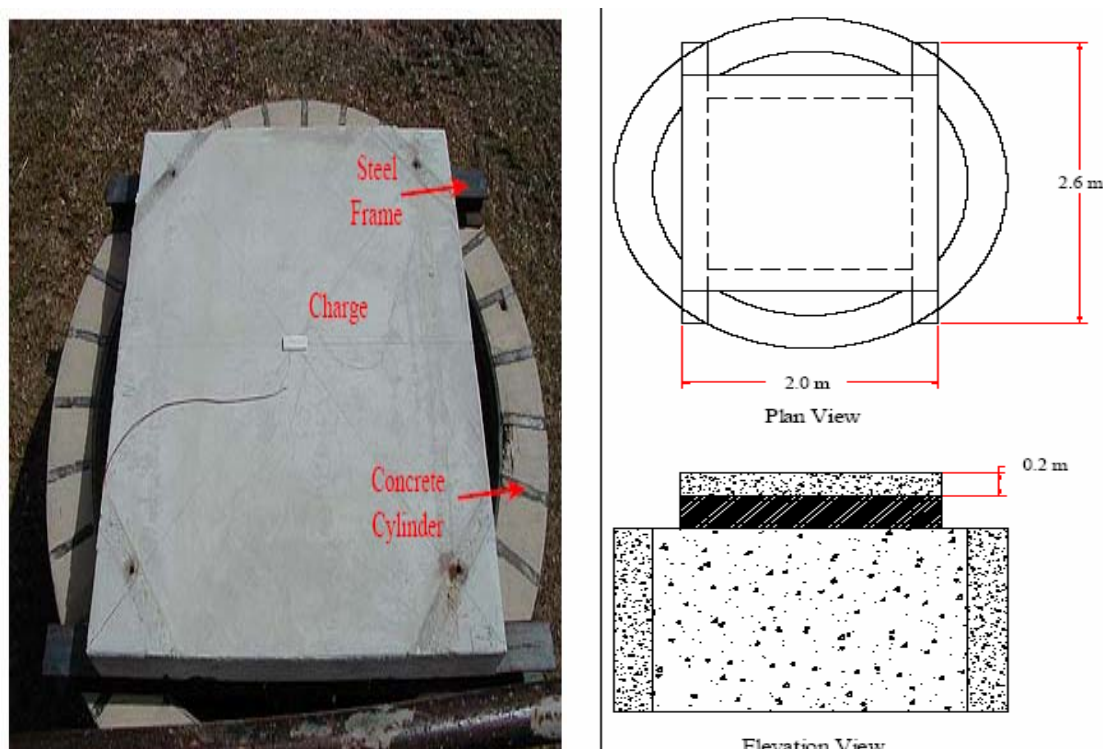


圖 1.1 純混凝土板接觸爆炸試驗配置圖 (Akers 與 Phillips^[1], 2004)

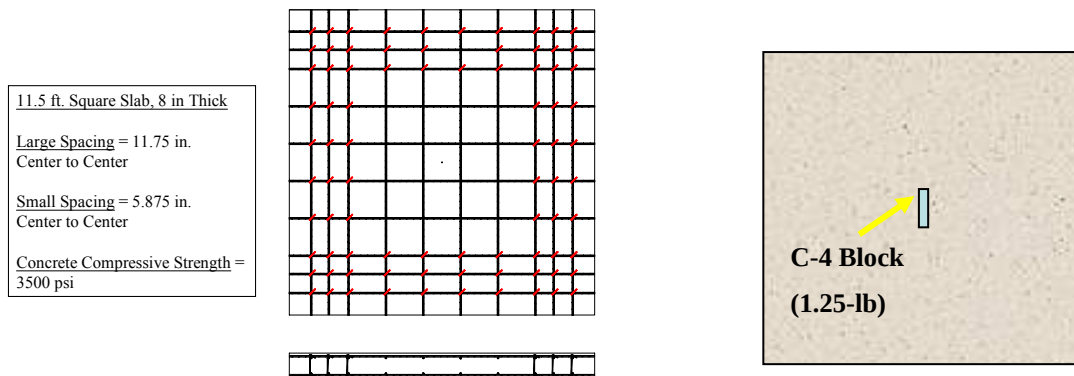


圖 1.2 鋼筋混凝土板接觸爆炸試驗配置圖 (Akers, et al.^[2], 2005)

貳、研究方法

本研究的方法是以流固耦合為理論基礎，利用 LS-DYNA 有限元素分析軟體中的 ALE 流固耦合數值模式，配合美軍技術手冊 TM5-1300^[3]與 TM5-855-1^[4]

註³：Department of The Army, “Structures to Resist The Effects of Accidental Explosions,” Technical Manual TM5-1300, 1990.

註⁴：Department of The Army, “Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons,” Technical Manual TM5-855-1, USA, 1998.

等經驗公式以及參考文獻中混凝土板爆炸實驗結果相互的驗證，進行鋼筋混凝土板承受矩形炸藥接觸爆炸數值模式參數研究。本研究所使用之 LS-DYNA 有限元素分析軟體數值模式理論，說明如下。

2.1 有限元素分析軟體數值模式

有限元素分析軟體的基本類型，依據其參考座標系統大體上可以分為兩種類型：即 Lagrangian 描述法（亦稱材料描述法）以及 Eulerian 描述法（亦稱空間描述法），後來又發展了 ALE 描述法（Arbitrary Lagrangian-Eulerian）、CEL 描述法（Coupled Eulerian-Lagrangian）、以及近年來所發展的無網格法（Meshless Methods），特別是光滑質點動力學法（Smoothed Particle Hydrodynamics 簡稱 SPH）在衝擊爆炸效應中亦得到廣泛應用。以下係針對 LS-DYNA 程式中最常見的 3 種描述法提出說明^[5, 6]：

（1）Lagrangian 描述法

Lagrangian 描述法是將元素的單元網格定義附著在物體上，隨著材料的流動而產生單元網格的變形。各網格的質量保持守恆，但是其體積卻可隨時間而改變，優點為邊界較易被描述，具有追蹤一個質點隨時間歷程變化的能力。惟缺點在於處理大變形問題時，例如爆炸問題，網格會因為嚴重扭曲甚至產生負體積（Negative Volume）或使得時間步幅（Time Step）變的過小，最後使得程式發生數值錯誤而終止運算。而由於固體力學所觀察之重點在於材料的變形，因此在分析時多採此法。

（2）Eulerian 描述法

此描述法是材料在一個元素網格固定的空間中流動。其優點為網格不會變形；其次可掌握流體流動的問題。缺點為需要規劃較大的流體網格流動空間，以能涵蓋問題所能描述的物理空間，此法多用於流體與氣體。

（3）ALE 描述法

ALE 描述法可以克服網格單元嚴重變形所引致的數值計算困難，並完成

註⁵：Buyuk, M., Cing, D., Kan, C. D. S., and Bedewi, N. E., “Moving Beyond the Finite Element Methods and Meshless Methods for a Ballistic Impact imulation, ” 8th LS-DYNA Users Conference: Penetration/Explosive, Michigan, Ch.8, pp. 81-96, 2004.

註⁶：LS-DYNA Version 970 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2003.

流體與固體耦合的動態分析，即流體採用 Eulerian 描述法，而固體採用 Lagrangian 描述法。ALE 描述法首先會執行一個或數個 Lagrange 時步計算，此時的網格單元會隨著材料的流動而產生變形，隨後才執行 ALE 時步計算。

Baum, et al.^[7] (2003) 提到在過去的幾年中，關於流固耦合 (Coupled Fluid Structure) 分析建立數值模型的方法中，均採用共點方式網格劃分 (Glued-Mesh) 所有 CFD (Computational Fluid Dynamics) 及 CSD (Computational Structural Dynamics) 介面都是互相配合的 (Match)。近來則研發一種新的網格劃分方法，稱之為嵌入式網格 (Embedded-Mesh) 的方法，係將 CSD 的物體網格流過 CFD 的網格區域，在所有的流固耦合分析中建立模型時，流體網格與固體網格必須是分開建立的，在流體網格方面採用共點方式建立，固體網格方面則採用接觸模式建立，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，並且流體網格與固體網格的網格大小有所建議，其中固體網格大小須至少為流體網格的 2 倍^[8,9]。

2.2 材料組構律

描述材料系統內部巨觀現象的數學模式，一般稱之為組構律 (Constitutive Law)。材料組構律即應力張量 (Stress Tensor) 與應變張量 (Strain Tensor) 的關係。一般而言材料在靜力狀態下，僅以材料組構律來描述即可，但材料在高速動力狀態下，當物體的速度大於材料音速 (Material Sound Velocity) 時，由於體積應力大，狀態方程式明顯重要，因此材料性質需搭配使用狀態方程式。有關一般常用的材料參數方面，可參考 LS-DYNA 使用手冊*MAT 部分來

註⁷ Baum, J. D., Mestreau, E. L., Luo H., Löhner R., Pelessone D. and Charman, C., “Modeling Structural Response to Blast Loading a Coupled/CFD/CSD Methodology,” Design and Analysis of Structures against Impact /Impulsive/Shock Loads Conference, Japan, pp. 319-326, 2003.

註⁸ Gebbeken, N., and Ruppert, M., “On the Safety and Reliability of High Dynamic Hydrocode Simulations,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999.

註⁹ Mullin, M. J., and O’Toole, B. J., “Simulation of Energy Absorbing Materials in Blast Loaded Structures,” 8th International LS-DYNA Users Conference: Penetration/ Explosive, Michigan, Ch.8, pp. 67-80, 2004.

設定，而本研究中所用的材料模式共有炸藥 (*MAT8)，空氣 (*MAT9)，剛體 (*MAT20)，鋼筋 (*MAT3)，混凝土 (*MAT16) 等 5 種，分別表示如下。

(1) 炸藥 (*MAT 8)

在 LS-DYNA 程式中，是以編號 8 號 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 的炸藥材料模式，來模擬高爆型的炸藥，在選用時需要搭配 JWL 狀態方程式來描述其材料行為如式 (2.1)。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V_r} \right) e^{-R_1 V_r} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V_r} \right) e^{-R_2 V_r} + \frac{\omega E_o}{V_r} \quad (2.1)$$

其中， A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 等參數皆為方程式係數， P 為壓力， V_r 為相對體積， E_o 為初始的能量密度。

(2) 空氣 (*MAT 9)

在 LS-DYNA 程式中，空氣材料是使用編號 9 號 *MAT_NULL 的材料模式，在選用時亦需要搭配 LINEAR_POLYNOMIAL 狀態方程式來描述其材料行為如，式 (2.2)。

$$P = C_o + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_o \quad (2.2)$$

其中， E_o 為初始的能量密度， μ 為動態黏滯係數， $C_i, i=0 \sim 6$ 為控制係數。而本研究將此用來描述空氣狀態方程式化簡為 (2.3) 式 (設 C_o 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 $C_6=0$ ，並令 $C_4=C_5=\gamma-1$)。

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho_{current}}{\rho_{initial}} E_o \quad (2.3)$$

$$E_o = \rho_{initial} C_v T \quad (2.4)$$

其中 $\frac{\rho_{current}}{\rho_{initial}}$ 為相對密度， γ 為空氣比熱， $\rho_{initial}$ 為空氣密度的初始值， $\rho_{current}$

為目前的空氣密度值， C_v 為空氣的定容比熱， T 為空氣初始溫度。

(3) 剛體 (*MAT 20)

剛體材料的編號使用 20 號 *MAT_RIGID，用來定義有限元素模型剛硬及變形不重要的部份，可以大量減少電腦數值運算的時間，這是因為不論有限元素模型定義了多少節點，剛體內的所有節點自由度都會耦合到剛體的質量

中心，故對於所定義的剛體材料而言，剛體只有 6 個自由度。但使用剛體應注意的問題有以下幾點：

1. 剛體束制條件，須在材料參數中給定，不可對剛體上的節點進行單點束制。
2. 剛體材料參數值應使用真實的值，如楊氏模數 (Young's modulus)、柏松比 (Poisson's ratio) 和密度。不可以認為剛體不變形就將楊氏係數設定無限大。而本研究剛體材料所使用的楊氏模數、柏松比和密度係以鋼板材料為主，惟因鋼板密度 (7.83 g/cm^3) 與空氣密度 (0.00129 g/cm^3) 相差太大，造成程式無法計算，故將剛體材料密度參照李文志^[10] (2004) 更改為 0.01 g/cm^3 以供後續之研究。
3. 兩剛體間不能共用節點，須透過束制 (*CONSTRAINED_RIGID_BODIES) 進行合併。但剛體和柔性體連接時，則選擇相連接的部份節點設成集合 *SET，並利用 (*CONSTRAINED_EXTRA_NODES) 將其定義成剛體的集合。
4. 對於模型較複雜或網格較粗時，人工定義剛體的慣性則較為精準。

(4) 鋼筋 (MAT 3)

鋼筋材料編號為 3 號 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料，所採用的為理想應力-應變曲線模型，計算時參數為等向硬化材料 ($\beta=1$) 如圖 2.1 所示，其中塑性硬化模數 ETAN (Plastic-Hardening Modulus) 控制鋼筋降伏後塑性硬化應變，其值由極限強度 (Ultimate Strength) 約為降伏強度的 1.55 倍所得，另外有關應變率係數如 (2.5) 式所示，其中 P 、 C 為應變率參數， $\dot{\epsilon}$ 為應變率。

$$\text{應變率係數} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \quad (2.5)$$

註¹⁰ 李文志，“流固耦合在鋼板承受爆壓數值模式之應用”，碩士論文，中正理工學院，桃園，2004。

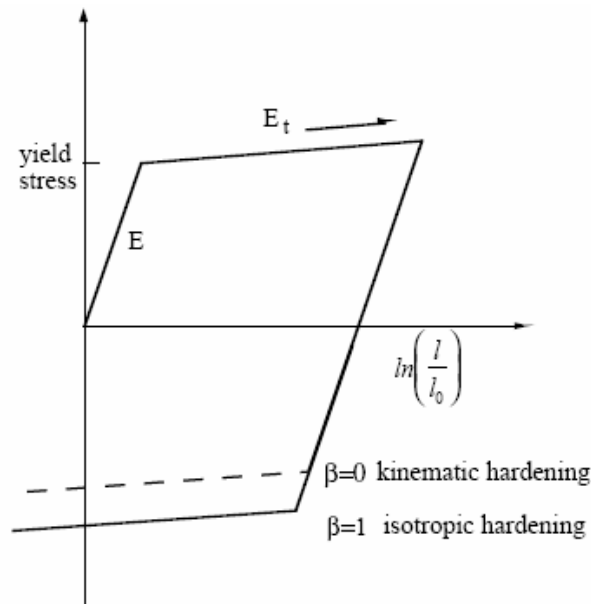


圖 2.1 LS-DYNA 3 號等向硬化材料 ($\beta=1$) 材料示意圖

資料來源：LS-DYNA Version 970 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2003.

(5) 混凝土 (MAT 16)

Schwer^[11](2001)以編號 16 號的*MAT_PSEUDO_TENSOR 混凝土材料，導入擬張量混凝土模式「Pseudo Tensor Concrete Model」的 LS-DYNA 程式 Malvar^[12](1997)，其所需輸入的參數值分別為純混凝土 (PC) 及鋼筋混凝土 (RC) 兩部分。

不同的降伏破壞準則 (Yield Criterion) 決定了材料在降伏應力或應變狀態下，材料所承受應力的變化，而*MAT_PSEUDO_TENSO 材料則依據不同的降伏破壞準則，共可區分為兩個主要模式：(I) 降伏應力對壓力模式 (Tabulated Yield Stress Versus Pressure) 以及 (II) 損傷及破壞雙曲線模式 (Two Curve Model with Damage and Failure)。以下僅針對模式 II 介紹：

損傷及破壞雙曲線模式 (Two Curve Model with Damage and Failure)；如圖 2.2，是以雙降伏應力曲線對壓力來描述，上條包絡線用來描述最大極限應

註¹¹Schwer, L., Geomaterial Modeling with LS-DYNA, Livermore, California USA, 2001.

註¹²Malvar, L. J., Crawford, J. E., Wesevich, J. M., and Simon, D., "A Plasticity Concrete Material Model for DYNA3D," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, pp. 847-873, 1997.

力，下條包絡線則是描述混凝土破壞後殘餘應力。

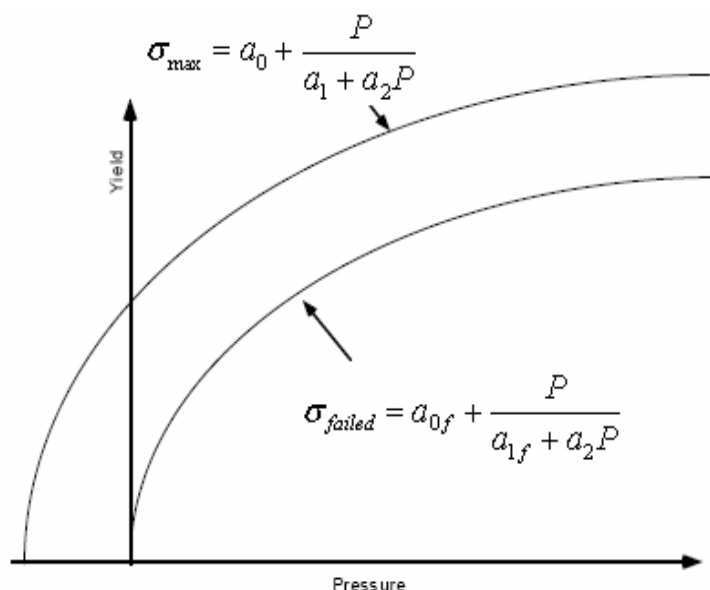


圖 2.2 混凝土雙曲線損傷及破壞材料模型示意圖

資料來源：LS-DYNA Version 970 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2003.

LS-DYNA 程式在 *MAT_PSEUDO_TENSOR 材料模式 II 中，提供了內定混凝土參數設定的功能，當參數 a_0 輸入為負值時，即為單位轉換係數， σ_{cut} 參數輸入值則為混凝土無圍抗壓強度 f'_c ，在計算中所需的拉斷應力 σ_{cut} 及狀態方程式等參數則會在計算中自動產生。

而本研究所採用的即是材料參數自動產生之模式，以及材料侵蝕 (*MAT_ADD_EROSION) 條件中的失效主應變值 (EPSP1) 與失效剪應變值 (EPSSH) 等侵蝕條件為主要參數探討，以做為爾後的分析基礎。

2.3 經驗公式

以下針對自由空氣中爆炸、地表爆炸以及鋼筋混凝土接觸爆炸之經驗公式說明如下。

(1) 自由空氣中爆炸 (Free Air Burst) 與地表爆炸 (Surface Burst)：

當爆炸位置在自由空氣中時，其衝擊波不受地面反射波之干擾，假設炸藥為球狀 TNT，重量為 W (lbs)，距離為 R (ft) 時，則公式 2.6 可得其縮尺距離 Z 值 (Scaled distance)

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (2.6)$$

將式 2.6 所計算之 Z 值代入圖 2.3，可得到正向（Positive Phase）衝擊波等各項爆炸參數。

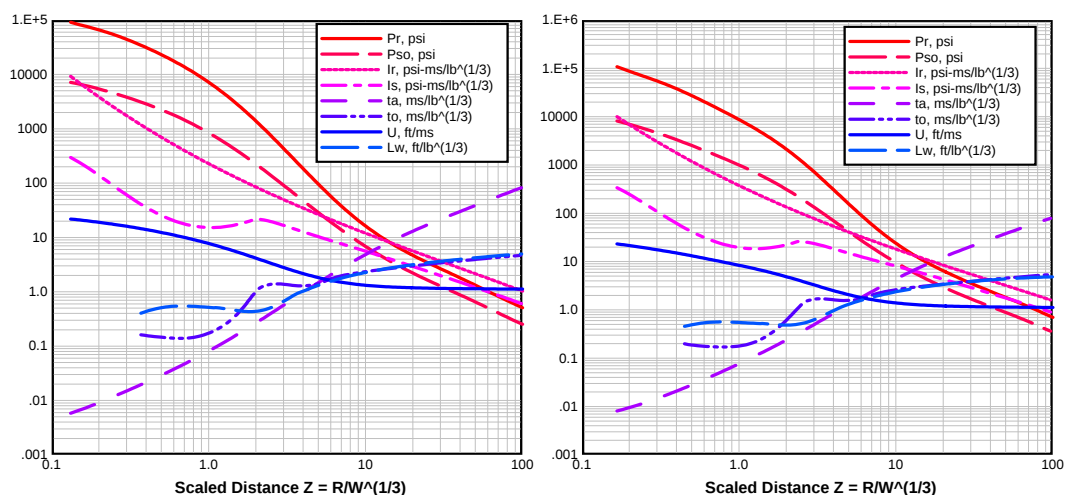


圖 2.3 縮尺距離於自由空氣中之爆壓（左）與地表爆炸之爆壓（右）
資料來源：Department of The Army, “Structures to Resist The Effects of Accidental Explosions,” Technical Manual TM5-1300, 1990.

1. P_r =反射壓極值（Peak Positive Normal Reflected Pressure, psi）。
2. P_{so} =入射壓極值（Peak Positive Incident Pressure, psi）。
3. i_r =反射壓衝量（Positive Normal Reflected Impulse, psi-ms）。
4. i_s =入射衝量（Positive Incident Impulse, psi-ms）。
5. t_a =到達時間（Arrival Time, msec）。
6. t_0 =延時（Duration of Positive Phase, msec）。
7. U =衝擊波波速（Shock Front Velocity, ft/ms）。
8. L_w =波長（Wave Length of Positive Phase, ft）。

（2）鋼筋混凝土接觸爆炸產生之坑洞（Crater）

由於鋼筋混凝土板接觸爆炸時，在接觸面會產生坑洞破壞。依據美軍技術手冊 TM5-855-1^[4]經驗公式或依圖 2.4 所示，可求得坑洞直徑以及深度。

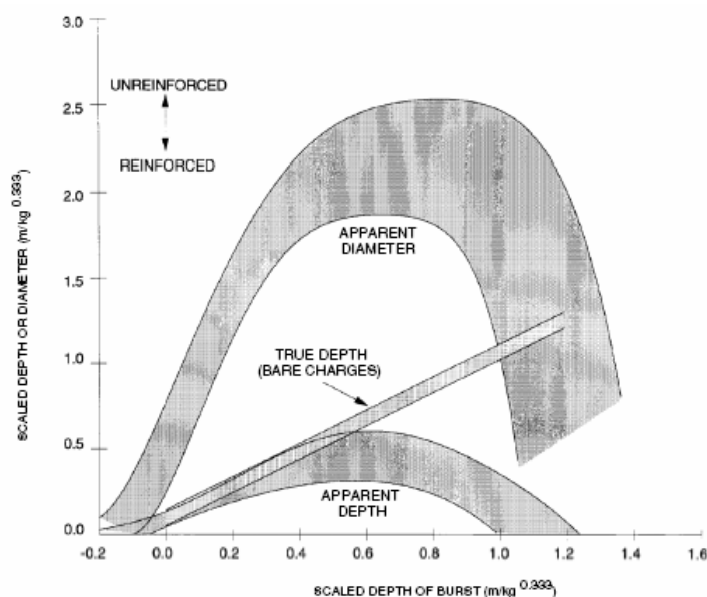


圖 2.4 鋼筋混凝土接觸爆炸形成坑洞

資料來源：Department of The Army, “Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons,” Technical Manual TM5-855-1, USA, 1998.

參、爆炸數值模式之建構

首先針對「自由場空氣爆炸」與「地表爆炸」進行數值模擬，並了解其可行性。藉由網格收斂性分析、時間步幅穩定性收斂，建立一個已收斂且穩定之數值模型，並將「自由場空氣爆炸」以及「地表爆炸」數值模型所得之爆壓及衝量模擬值，與年李文志（2005）^[10]球形炸藥數值模型及美軍技術手冊 TM5-1300^[3]相比較，探討縮尺距離 Z 值在何種範圍內，其爆壓與衝量模擬值相較於 TM5-1300^[3]較為合理。

3.1 自由場爆炸數值模型

將矩形形狀炸藥與空氣以共點方式共構成 Eulerian 網格，並使炸藥中心點以及起爆點置於座標原點。由於簡化模型可以縮短程式計算時間及降低資料存取量，故本文採用具有 3 個對稱面、3 個對稱軸、及 1 個對稱點的 1/8 對稱簡化模型作為基準進行收斂性分析，其全/簡模型示意圖如圖 3.1 所示。以 TNT 炸藥量 227 公斤（約 500 磅）、炸藥邊長 51.83cm、空氣邊長 1036.6cm 之 1/8 對稱簡化模型，進行自由場爆炸之數值模擬。

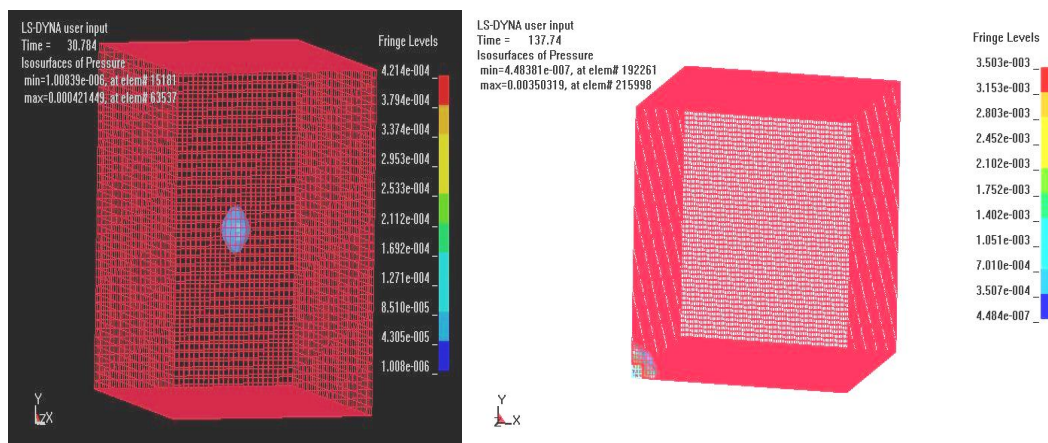


圖 3.1 自由場爆炸全/簡模型示意圖
(左圖為全模型；右圖為 1/8 對稱簡化模型)
資料來源：作者自行繪製

(1) 矩形模型與圓形模型及 TM5-1300 值比較

考量空氣溫度效應，依據李文志的研究成果，提高爆炸時初始壓力及溫度，對於整體的爆壓歷時有顯著的提升。加了 3000K 的溫度效應後發現矩形模型與圓形模型在爆壓及衝量模擬值和 TM5-1300 的比較結果，可發現爆壓值在縮尺距離 $Z=0.4\text{m/kg}^{1/3} \sim 0.8\text{m/kg}^{1/3}$ 範圍間有提升的現象，而其爆壓對數誤差值為 5% 以內。同樣的對於衝量值而言亦是有提升的效果，其衝量對數誤差在 3% 以內。此結果驗證了本數值模型在此區間內提高溫度效應對於爆壓及衝量模擬值有提高的結果。爆壓對數誤差結果如圖 3.2 所示，衝量對數誤差分析如圖 3.3 所示。

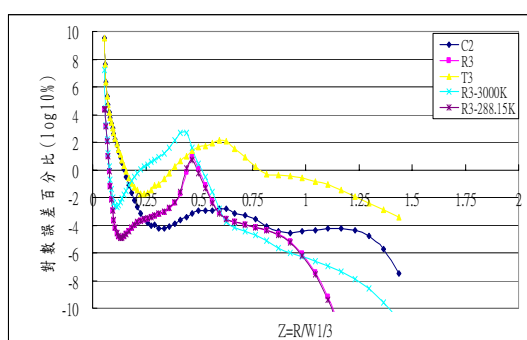


圖 3.2 矩形與圓形模型及 TM5-1300
爆壓對數誤差比較分析圖

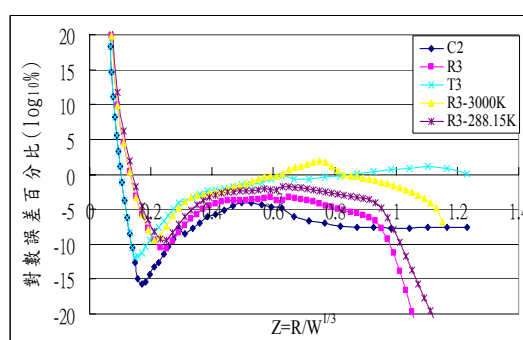


圖 3.3 矩形與圓形模型及 TM5-1300
衝量對數誤差分析圖

資料來源：作者自行繪製

(2) 自由場空氣近距離分析

為探求溫度效應對於近距離爆炸爆壓及衝量值的影響，使用 1 磅 TNT，溫度在 1000K 與 3000K，其爆壓值與衝量值在縮尺距離 $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ 以內沒有明顯影響。

3.2 地表爆炸數值模型

地表爆炸即是爆震波與地面耦合的結果。數值模型如圖 3.4 所示。炸藥量為 227 公斤、炸藥邊長 51.83 公分的立方體 TNT，上方空氣模型與下方鋼板（剛體）模型為邊長 518.3 公分的立方體空間。探討地表爆炸在遠離地面元素（代稱 Middle, RS3）與地表面元素（代稱 1st, RS3-1）之爆壓及衝量值的分布情形，以及加了溫度效應後的變化值，故選取模型元素遠離地表面以及近地表面的空氣元素作為探討，如圖 3.5 所示。

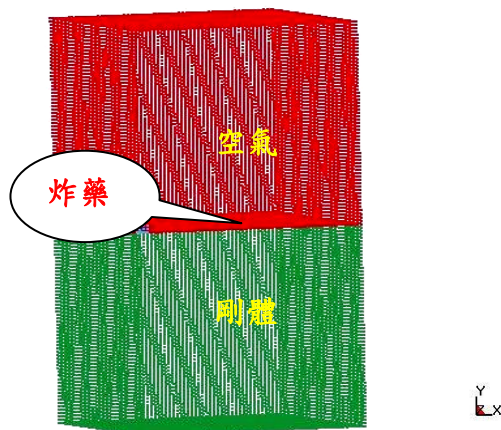


圖 3.4 地表爆炸數值模型

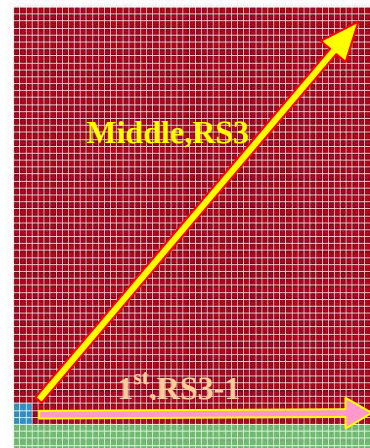


圖 3.5 遠離地面元素與地表面元素示意圖

資料來源：作者自行繪製

(1) 爆壓比較

遠離地面元素，加了 3000K 溫度效應（代稱 RS3-3000K）之後，其爆壓值有顯著提升，其對數誤差在 $Z=0.3\text{m/kg}^{1/3} \sim 1.05\text{m/kg}^{1/3}$ 的範圍間對數誤差分布皆在 5% 以內（如圖 3.6）。

而地表面元素，加了 3000K 溫度效應之後，其爆壓值亦有提升現象，其對數誤差在 $Z=0.3\text{m/kg}^{1/3} \sim 1.05\text{m/kg}^{1/3}$ 的範圍間對數誤差分布皆在 20% 以內（如圖 3.7）。

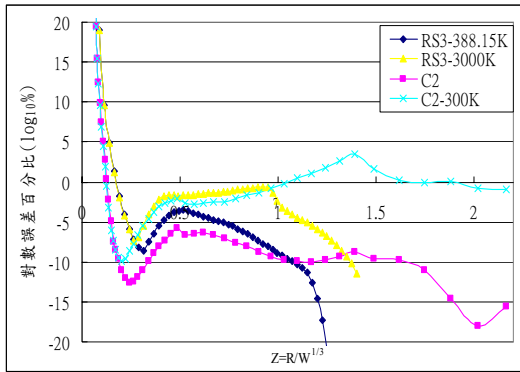


圖 3.6 遠離地面元素 (Middle,RS3)
爆壓對數誤差值

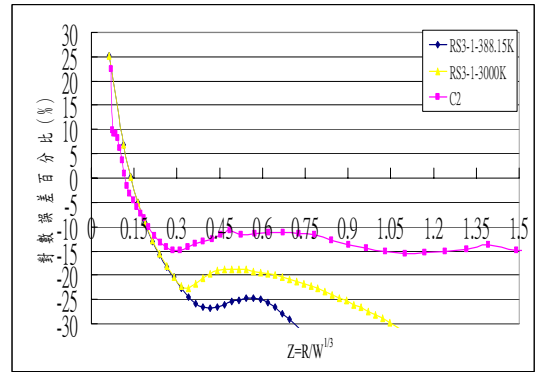


圖 3.7 地表面元素 (1st,RS3-1)
爆壓對數誤差值

資料來源：作者自行繪製

(2) 衡量比較

遠離地面元素，加了 3000K 溫度效應後（代稱 RS3-3000K）之後，其衡量值有顯著提升，對數誤差皆在 4%以內（如圖 3.8）。而地表面元素，加了 3000K 溫度效應後（代稱 RS3-1-3000K）之後，其衡量值有顯著提升，其對數誤差在 20%以內（如圖 3.9）。

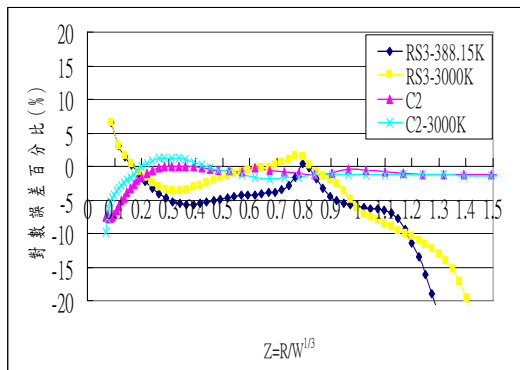


圖 3.8 遠離地面元素 (Middle,RS3)
衡量對數誤差值

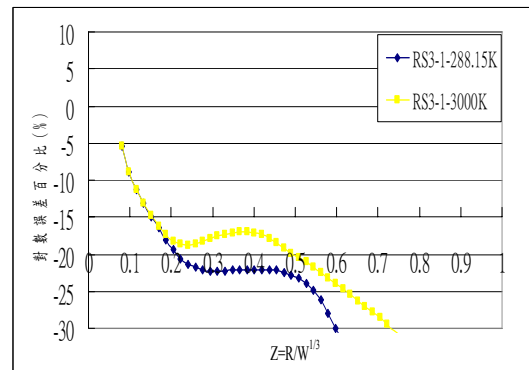


圖 3.9 地表面元素 (1st,RS3-1)
衡量對數誤差值

資料來源：作者自行繪製

肆、鋼筋混凝土板爆炸數值模式建構

首先以矩形形狀 TNT 炸藥、空氣以及邊長與厚度均無限大之純混凝土，建立純混凝土接觸爆炸 ALE 數值模型，並藉由參數研究方式，探討不同參數值對於純混凝土接觸爆炸所產生坑洞大小及深度的影響，並參考美軍技術手冊 TM5-855-1 (1998) ^[4] 的經驗公式，針對純混凝土所產生的破壞範圍，並比對爆炸所產生坑洞大小的差異性，歸納出合理之參數值。將相關參數用以模

擬 Akers,與 Phillips^[1](2004)之純混凝土板接觸爆炸,以及 Akers et al.^[2](2005)之鋼筋混凝土板接觸爆炸等實驗,並比較數值模擬成果與實驗值之差異性。為了有效縮短程式計算時間以及減少資料存取量,本研究採用 2 個對稱面及 1 個對稱軸之 1/4 對稱簡化模型,以取代全模型純混凝土板接觸爆炸,而做為爆炸分析的基本模型,圖 4.1 為全/簡模型之示意圖。

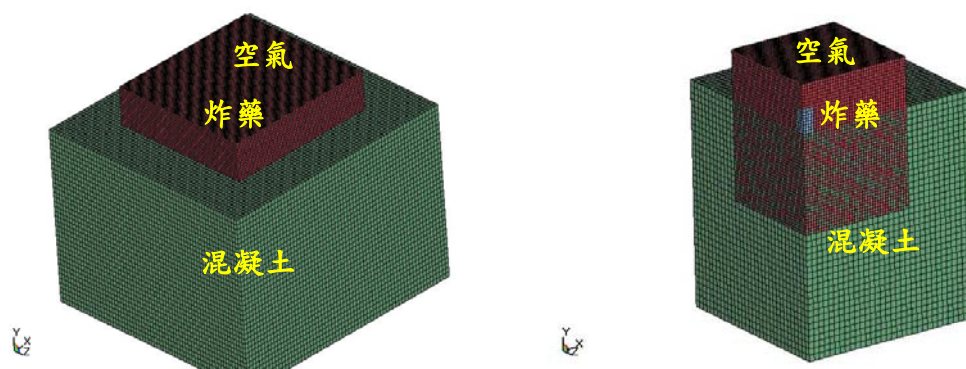


圖 4.1 純混凝土接觸爆炸全/簡模型示意圖
(左圖為全模型;右為 1/4 簡化模型)

資料來源：作者自行繪製

4.1 純混凝土板接觸爆炸數值模擬

依據研究結果顯示,對於純混凝土板正面坑洞破壞範圍,可得到兩組最為接近試驗值之參數值:

- (1) 在剪應變侵蝕 (EPSSH) 控制為 0.001 時,其水平方向之破壞直徑與垂直方向破壞直徑,相較 Akers 與 Phillips^[1] (2004) 中之第 5 個接觸爆炸試驗,如圖 4.2 所示,誤差值分別為-12.07%與-0.66%。
- (2) 圖 4.3 顯示組合應變侵蝕控制 (失效剪應變值為 0.002+失效主應變值 0.003) 時,其水平方向破壞直徑與垂直方向破壞直徑之誤差值分別為-12.07%與-0.66%。圖 4.4 顯示剪應變侵蝕為影響混凝土板破壞之主要因素,在混凝土板正面會隨失效剪應變值增加,其破壞曲直徑及深度呈現減少趨勢。

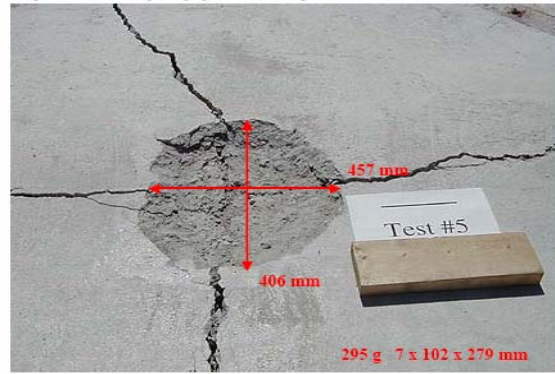


圖 4.2 純混凝土板接觸爆炸實驗結果圖 (Akers 與 Phillips^[1], 2004)

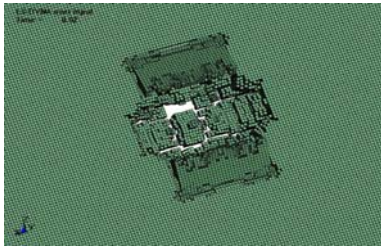


圖 4.3 純混凝土板接觸爆炸
本研究模擬值 (組合應變侵蝕)

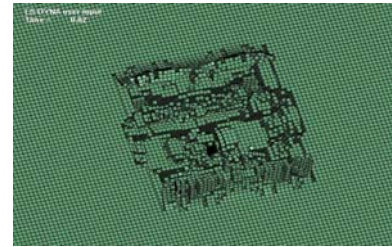


圖 4.4 純混凝土板接觸爆炸
本研究模擬值 (剪應變侵蝕)

資料來源：作者自行繪製

4.2 鋼筋混凝土板接觸爆炸數值模擬

本節以 C4 矩形炸藥其炸藥量為 0.567 公斤與炸藥邊長為 25.4mm×25.4mm×279.4mm、空氣邊長為 20.32cm×27.94cm×20.32cm、混凝土邊長為 74.6125cm×20.32cm×74.6125cm，混凝土抗壓強度 24.13MPa 以及四周設定為無反射邊界條件，所採用的鋼筋為 3 號鋼筋（鋼筋直徑 0.953cm），且不考慮鋼筋元素侵蝕效應，鋼筋斷面假設為矩形，鋼筋間距為 29.845cm 之 1/4 對稱簡化模型，空氣與炸藥為 Eulerian 網格，採用共用節點方式建模，鋼筋與混凝土為 Lagrangian 網格亦採共用節點方式建模，流體與固體之間透過網格重疊 (Overlap) 方式，以 $\delta_{\text{Lagrange}}/\delta_{\text{Euler}}=2$ 的網格密度條件建立模型，其 1/4 簡化模型尺寸配置如圖 4.5 所示。

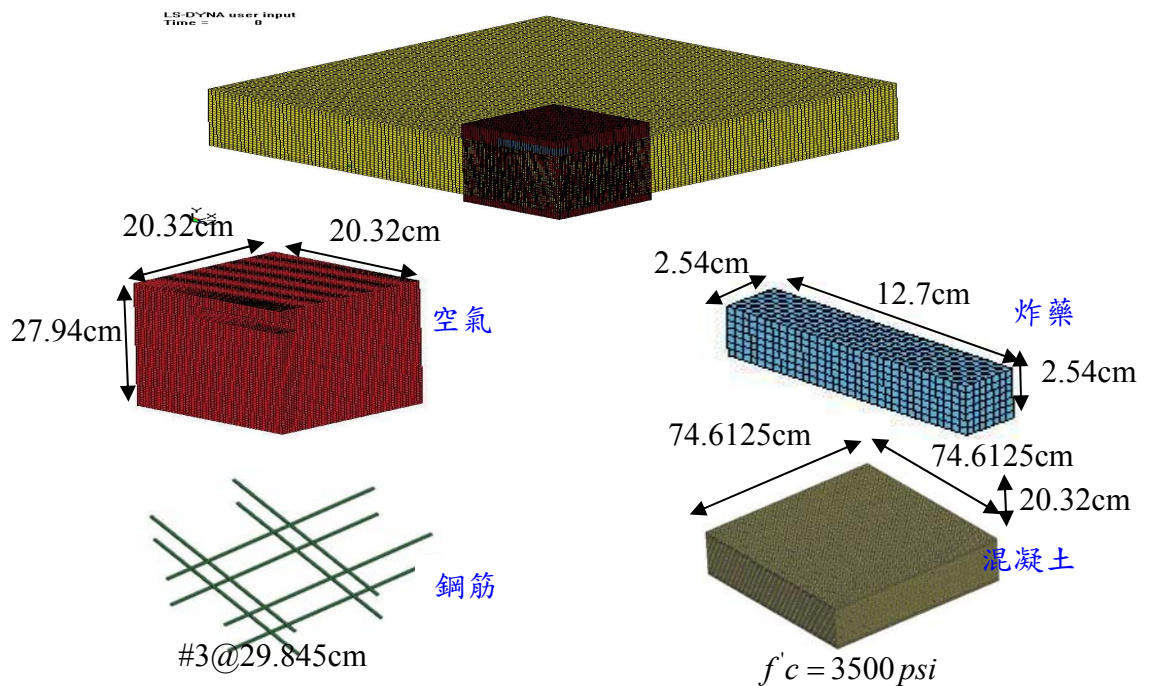


圖 4.5 鋼筋混凝土板接觸爆炸數值模擬 1/4 對稱簡化模型尺寸配置圖

資料來源：作者自行繪製

鋼筋所使用的等級為 Grade 60，當失效剪應變值在 0.002 時，其鋼筋混凝土板之水平方向破壞直徑與實驗值之誤差為 0.5761%，垂直方向之誤差為 -4.5816%，但對於鋼筋而言，由於爆炸所產生的高應變率會導致材料的動力硬化行為，此種狀況必須考慮鋼筋應變率效應（SRC=40，SRP=5）之數值模型。模擬值與文獻實驗值及模擬值^[2]之結果比較如圖 4.6 所示。

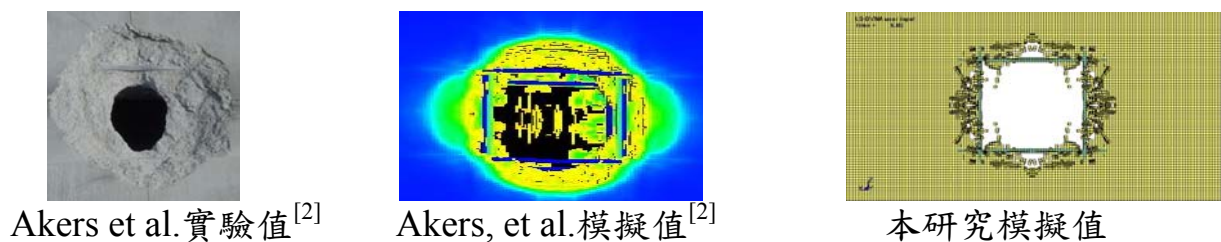


圖 4.6 鋼筋混凝土板接觸爆炸模擬值與 Akers, et al.^[2]比較

資料來源：作者自行繪製

伍、數值模擬在其他軍事用途方面之研究

有關利用電腦進行數值模擬分析，在企業界中早已被廣泛的使用在產品的研發設計與評估測試階段，主要應用領域可概略區分為：土木結構、國防工業、汽車工業、航太工業、模具業、電子產業、生醫應用等。目前國內電

子製造業已成功地將電腦數值模擬應用於電子產品掉落、衝擊、振動、疲勞分析、球擊測試、包材設計及 IC 製程分析等領域。而基礎工業則成功地應用於車體結構設計、車輛振動及舒適度設計、鈑金成型、建築物防震設計、船體結構及流固分析等領域。如圖 5.1^[13]所示。

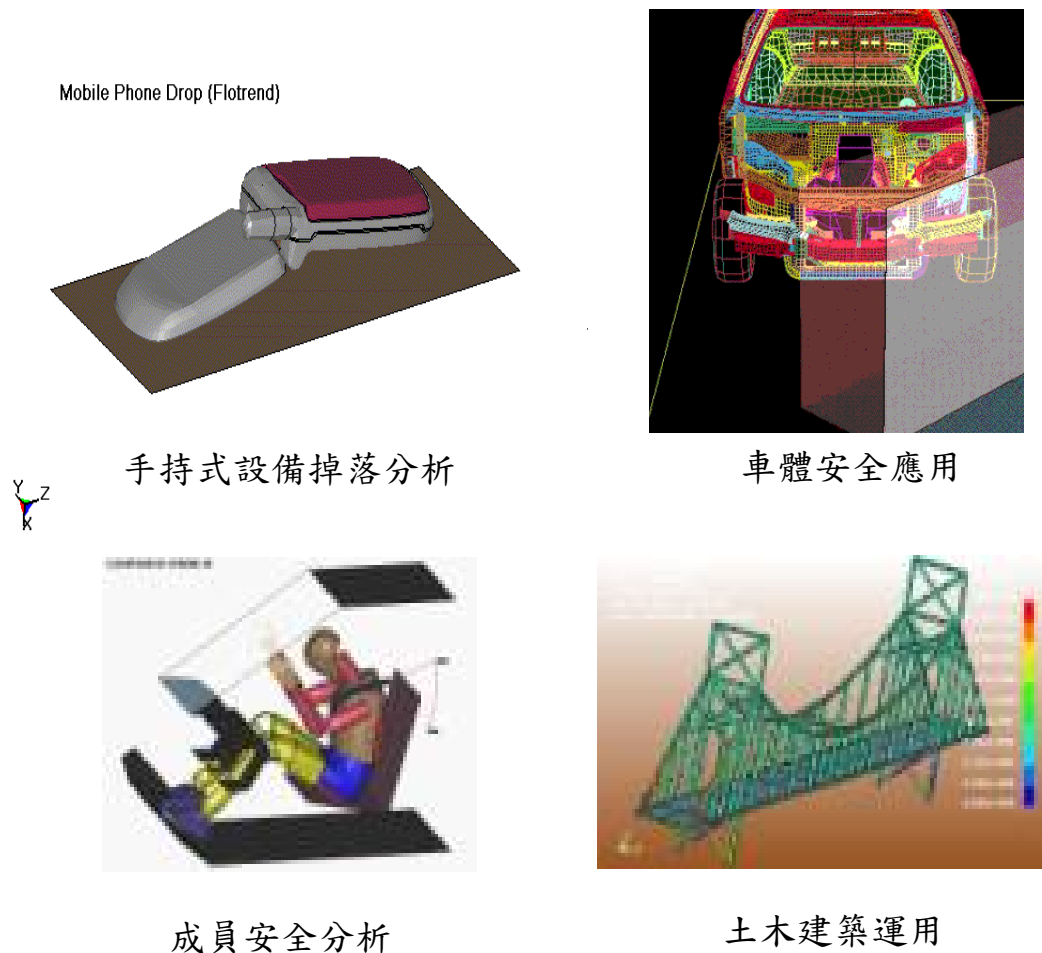


圖 5.1 電腦數值模擬的應用

資料來源：<http://www.flotrend.com.tw/products/st/lsdyna/index.php>^[13]

在此階段中由於需要投入大量的研究時間、人力與經費，用以測試產品性能，藉由不斷的試驗與擇優汰劣方式，期能達成最符合經濟效益的最佳化設計。但未了減少研究經費不必要的支出與浪費，降低產品模型製作所需花費的成本以及減少研究開發的時間，數值模擬儼然已是企業界目前最重要的

註¹³<http://www.flotrend.com.tw/products/st/lsdyna/index.php>

研究工具之一。

然而，數值模擬技術除應用於企業界外，此技術亦已運用在軍事用途方面，而針對國內相關問題的研究茲列舉說明如下：

(1) 防貫穿研究：在戰爭中最可能遭受的敵人武器的威脅種類即是應力衝擊。故現代武器系統之發展方向，逐漸朝向於精準命中 (direct hit)、炸彈破片 (fragment) 傷害以及炸藥發生爆炸後之激震波 (shock wave) 對結構物所產生的破壞效應。軍事工程設施 (包含指揮所、掩體、防爆牆等) 在遭受敵飛彈武器空炸、碰炸、延遲炸後，會產生貫穿、爆炸、破片、彈坑、飛出物與震動等複雜效應，如何設計結構物防爆震及抗貫穿厚度，以確保我方人員、武器、裝備、物資之戰力保存則更顯重要。國內皮盛榮 (2004) [14] 對於投射體貫入鋼筋混凝土之數值模擬研究，探討鋼筋混凝土板承受貫穿效應所產生破壞行為以及建立混凝土材料參數資料庫，其鋼筋混凝土板數值模擬模型如圖 5.2 所示。

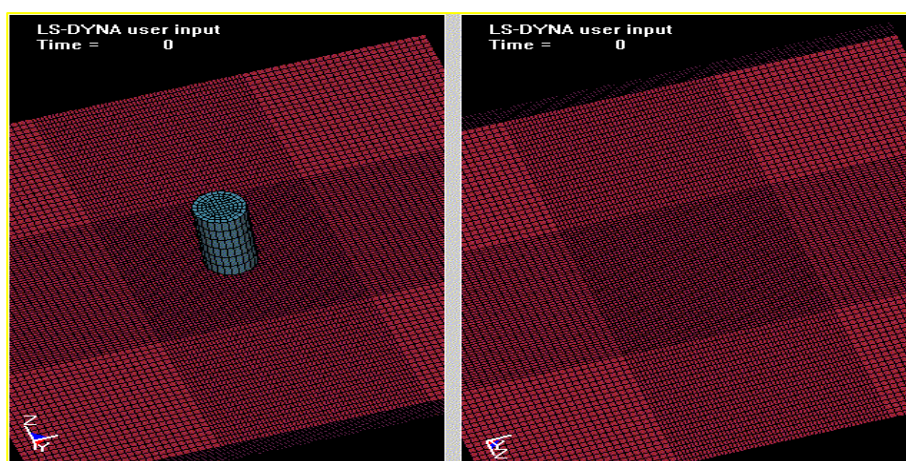


圖 5.2 鋼筋混凝土板貫穿數值模型^[14]

資料來源：皮盛榮，“鋼筋混凝土板貫穿之材料參數探討”，碩士論文，中正理工學院，桃園，2004。

(2) 防爆震研究：

我國重要軍事基地大多構築掩體，以防護敵軍之攻擊，但在掩體出入口並未全部安裝防爆門，尤其是空軍基地之飛機掩體。早期由於炸彈精準

註¹⁴皮盛榮，“鋼筋混凝土板貫穿之材料參數探討”，碩士論文，中正理工學院桃園，2004。

度低，掩體出入口遭受到攻擊之機率低。但是，目前炸彈之精準度在雷射或全球定位系統等導引下，已可近距離命中出入口，因此掩體設置防爆門，將可以保護掩體內部人員、武器與裝備之安全，主要功能為防止爆壓，火球侵入及碎片貫入等，故防爆門為防護結構之重要部份。國內郁文風則在（2003）^[15]本研究在探討防爆門受均佈爆壓下，門板及零配件（鉸鍊、門門及氣密條）之力學行為，做為防爆門設計參考，其數值模型如圖5.3所示。

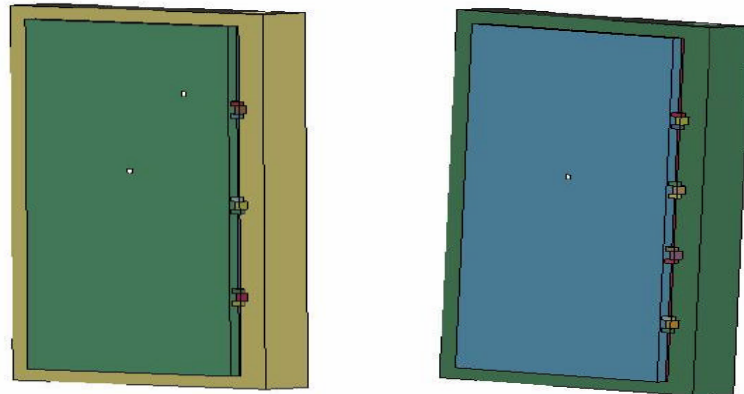


圖5.3 防爆門數值模型

資料來源：郁文風，“防爆門在均佈爆壓下之力學行為探討”，碩士論文，中正理工學院，桃園，2003。

另外國內李文志（2005）^[16]對於鋼板爆炸之數值模擬則有進一步探討，文中利用 LS-DYNA 有限元素分析軟體分別建立了自由場空氣爆炸（Free Air Burst）與地表爆炸（Surface Burst）數值模型，其所產生之入射爆壓與衝量值與美軍規範 TM5-1300 比較，並發現在探討炸藥及空氣相關的參數過程中，藉由改變氣體壓力及溫度狀態所建構的氣體爆炸模型，顯示提高初始壓力及溫度對於整體的爆壓歷時將有顯著的提升。其鋼板爆炸數值模型如圖 5.4 所示。

以上是國內目前利用數值模擬分析軟體，運用在軍事方面的部份，而未來亦可以朝錐型裝藥（Shaped Charge）的議題繼續延伸研究，其數值模形如圖 5.5 所示。

註¹⁵郁文風，“防爆門在均佈爆壓下之力學行為探討”，碩士論文，中正理工學院，桃園，2003。

註¹⁶李文志，“流固耦合在鋼板承受爆壓數值模式之應用”，碩士論文，中正理工學院，桃園，2005。

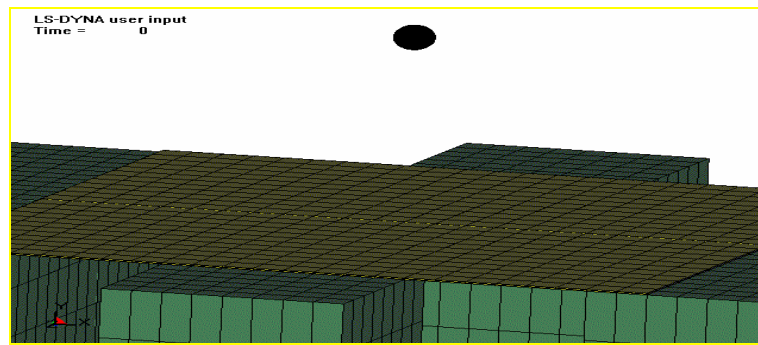


圖 5.4 鋼板爆炸數值模擬模型

資料來源：李文志，“流固耦合在鋼板承受爆壓數值模式之應用”，碩士論文，中正理工學院，桃園，2005。

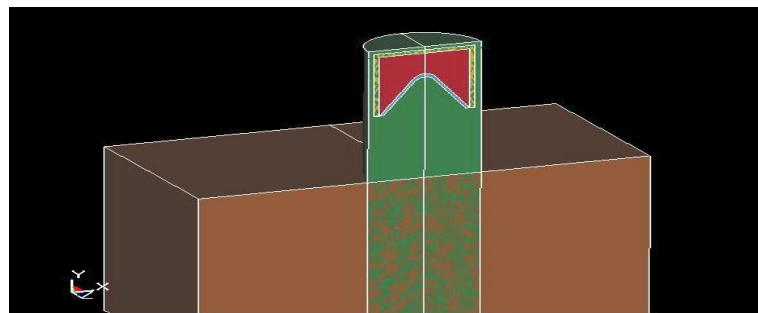


圖 5.4 鋼板爆炸數值模擬模型

資料來源：作者自行繪製。

陸、結論

本研究係利用 LS-DYNA 有限元素分析軟體，針對矩形炸藥之自由場空氣爆炸、地表爆炸、混凝土接觸爆炸、純混凝土板與鋼筋混凝土板接觸爆炸等進行數值模擬研究，藉由參數探討之方式歸納整理各參數之影響性建立資料庫，並可供未來相關軍事工程防護設計的參考依據。

所謂「沒有廉價的國防」，也正因為如此，國防建設必須在精簡成本的基礎上自立自強。當前共軍利用數值模擬技術，在學術研究期刊發表並結合國防科技研發的成果已漸具規模。故期盼國軍未來能將數值模擬技術運用在國防科技的領域上，建立各種大量的軍事參數資料庫，並不斷研發更新與突破，以因應現代化多變的戰爭型態。