

鋼筋混凝土結構在室內 爆炸狀況下試驗及數值模擬

作者\曲先莊中校

提 要

- 一、本研究透過小藥量爆炸實驗及運用 LS-DYNA 軟體數值模擬，針對鋼筋混凝土結構於室內爆炸狀況下之結構物行為進行研究。其中實驗部分在陸軍工兵學校支援下，透過不同藥量對鋼筋混凝土結構物進行內部爆炸實驗。
- 二、經由實際爆炸實驗顯示，在室內爆炸情形下，爆炸造成之炸坑大小及深度與炸藥重量及密度相關，炸藥本身密度越大，造成炸坑面積及深度越大，炸藥量越大造成炸坑面積及深度亦越大。
- 三、模擬結果顯示，運用 ALE 流固耦合算法與剪應變 0.003 侵蝕條件，雖可模擬鋼筋混凝土結構於小藥量室內爆炸狀況下之坑洞，但混凝土坑洞直徑誤差最大為 22% 深度則達 38%。

關鍵詞：內部爆炸、流固耦合、鋼筋混凝土。

前 言

國內外彈藥庫近年來發生幾起爆炸事故，如國外的俄羅斯聖彼得堡彈藥庫、阿爾巴尼亞彈藥庫，國內的南港、金門、馬祖、旗山彈藥庫等，均造成人員傷亡及附近民眾的恐慌。目前對設置彈藥庫的安全距離，已經有很多研究，但對於彈藥庫本身之破壞型態，相關研究較少。同時國內受限於炸藥之管制，並未有相關的試驗資料。在工兵學校的支援下，國內已能開始進行爆炸試驗，同時，隨著資訊技術的快速發展與普及，以電腦模擬方式來取代高成本與高危險之爆炸實驗越來越普遍，電腦軟體之爆炸數值模擬技術已逐漸成熟，但是其準確性必須有相關實驗數據做比對。因此，將可藉由少藥量爆炸試驗，來驗證數值模擬軟體之正確性。

對於結構物而言，當結構物發生內部爆炸時，爆壓、破片及衝擊波亦稱為衝擊荷載是探討結構物損壞的三項重要元素；當結構物發生內部爆炸時，會因為爆波在建構物內反射而增強。此外，依密閉的程度及爆炸產生之高溫、化學反應產生的氣體等均會增加施加於結構物上壓力和歷時，除非結構物有承受這些內部爆炸的設計，否則結構物最後將被破壞。適當的提供開口讓這些壓力由

室內傳遞到室外消散，可減少壓力及歷時。這種向外部宣洩的壓力一般稱為洩漏壓，而壓力在結構物內反射以及增強稱之為衝擊壓力，氣體及溫度的提升結合的壓力稱之為氣壓。¹

研究方法與步驟

本研究將以實驗所得之結果與數值分析進行比對，驗證數值模擬正確性。主要研究方法區分兩大部分，首先進行小尺寸的鋼筋混凝土爆炸實驗，以不同藥量之 C4 炸藥接觸鋼筋混凝土結構頂版爆炸，量測爆炸所造成的鋼筋混凝土破壞情形。其次將實驗結果與模擬結果進行比對，數值模擬採用 LS-DYNA Version 971, May 2007。

一、 爆炸實驗

本研究以不同重量之小藥量炸藥對相同規格鋼筋混凝土版結構實施內部爆炸破壞，觀察鋼筋混凝土結構承受爆炸後的破壞情形，量測爆炸造成破壞坑與疤落、裂縫等破壞情形提供日後數值分析上參考依據。

本實由工兵學校支援炸藥、相關器材及人員。實驗採接觸爆炸模式以期能以小藥量狀況下完成實驗，接觸位置為結構物內頂部中央位置。試體外部尺寸為 80cm×80cm×90cm，內部尺寸為 60cm×60cm×80cm，單層雙向鋼筋，結構物如圖一與圖二。並將炸藥位置移至試體內頂部中央，與試體直接接觸，內部裝藥如圖三，內部裝藥圖中炸藥與混凝土壁間顏色較深部分為矽膠，用途為使炸藥黏貼於鋼筋混凝土頂版，後因黏力不夠，故加設細電線，使炸藥能緊貼於鋼筋混凝土版，形成接觸爆炸。

二、 儀器與器材介紹

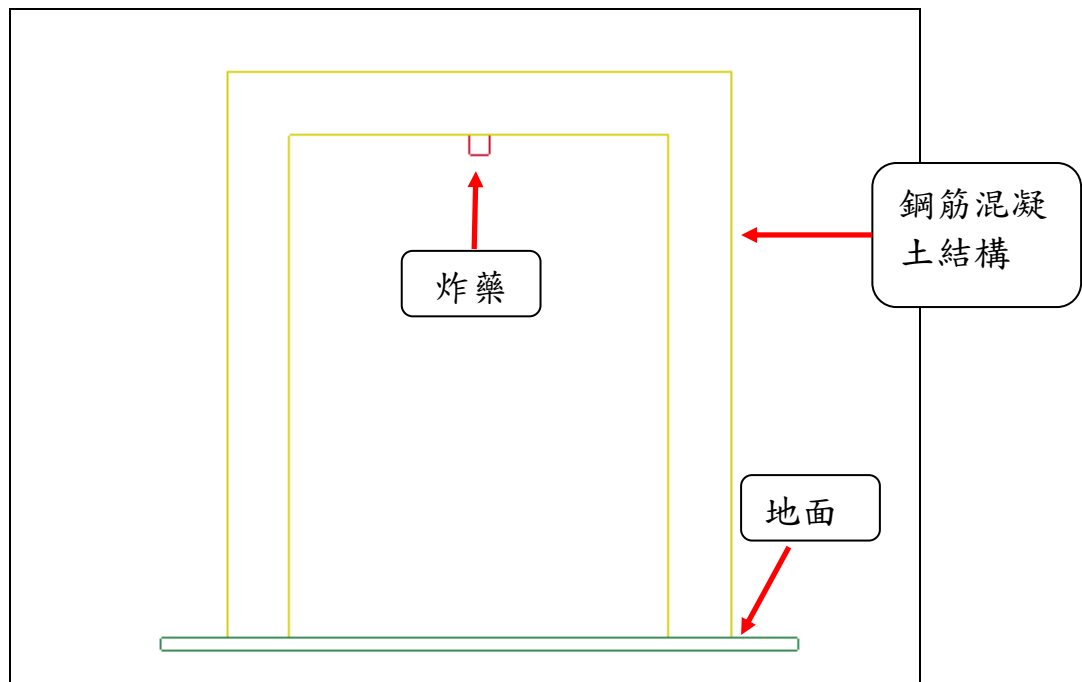
(一) 炸藥

使用炸藥為美製 C4 軍用炸藥 M5A1 藥包，其一端有火具孔，每個重為 1 公斤。每次爆破所需重量於實驗當天量秤。可任意將其揉捏成各種形狀，故適於各種不規則形狀之裝藥爆破。最大缺點是容易燃燒，所以不可接觸任何火種或熱源，以免發生危險。²必須用特製電雷管或爆炸導火索才能起爆，起爆後有毒，不適於密閉場所使用，其爆速為每秒 8,530 公尺。³

註¹ Departments of the Army, the Navy, and the Air Force, "Structures To Resist The Effects Of Accidental Explosions," Technical Manual TM5-1300, USA 1990

註² 同註 2

註³ 同註 2



圖一 鋼筋混凝土結構物模型示意圖

資料來源:作者自行繪製



圖二 鋼筋混凝土結構實驗設置外觀

資料來源:作者自行拍攝



圖三 鋼筋混凝土結構內部裝藥情形

資料來源:作者自行拍攝

(二)電雷管

使用電雷管為國造 10 號電雷管，主要用於電器點火，電雷管上裝有腳線，本實驗使用電雷管之外殼為鋁質。耗電電流為 0.6 安培、電阻 2.0 歐姆。⁴

電雷管設置時需先進行導通測試，並於 C4 炸藥上以雷管鉗插一個洞，使電雷管與炸藥能更準確的結合於預想位置及深度。⁵

(三)鋼筋混凝土結構

本實驗重新規劃之試體為單面開口之預鑄式鋼筋混凝土箱涵，箱涵外部尺寸為 80cm×80cm×90cm，壁厚 10cm，混凝土強度 210kgf/cm²，內部尺寸為 60cm×60cm ×80cm，使用鋼筋為 3 號鋼筋，以單層雙向方式設置，設置位置為混凝土壁的中央，鋼筋間距為 15cm。

爆炸實驗結果

室內爆炸實驗共計 10 次，使用試體為使用鋼筋混凝土結構，將炸藥置於結構物內混凝土版頂部中央，實驗使用炸藥重量分別為 25 克 2 次，30 克、40 克、60 克、70 克、100 克各 1 次，50 克 3 次，10 次實驗之實驗結果分述如後：

一、鋼筋混凝土結構-100 克

使用 C4 炸藥 100 克，爆炸時混凝土塊四處飛散，因堆疊沙包，使得試體與沙包相鄰的 3 個面中，有 2 個面因沙包阻擋而保存較完整，未與沙包接觸及其

註⁴ 同註 2

註⁵ 同註 2

右側與頂部等 3 面的混凝土結構嚴重毀損，無法量測炸坑大小及疤落狀況，鋼筋未斷裂，爆破後試體狀況如圖五。



圖五 鋼筋混凝土結構於 100 克 C4 炸藥內部爆炸後狀況

資料來源:作者自行拍攝

二、鋼筋混凝土結構-25 克

使用藥量為 25 克。2 次爆炸後，試體頂部外側均無明顯裂痕，於 4 面均有明顯裂痕，試體形狀保持完整，無明顯變形。與炸點接觸之內部有明顯炸坑，第 1 次炸坑大小為長 15.5cm、寬 14.6cm、深 3.0cm，第 2 次炸坑大小為長 12.1cm、寬 8.3cm、深 2.3cm，爆破後試體內部狀況如圖六。



圖六 鋼筋混凝土結構於第一次 25 克 C4 炸藥內部爆炸後-內部狀況

資料來源:作者自行拍攝

三、鋼筋混凝土結構-30 克

使用藥量為 30 克，爆炸後試體頂部外側有明顯裂痕，無疤落，4 面均有明顯裂痕，1 邊開裂，試體形狀無明顯變形，有混凝土塊掉落。與炸點接觸之內部則有明顯炸坑，炸坑大小為長 12cm、寬 10.0cm、深 2.2cm，爆破後試體內部狀況如圖七。



圖七 鋼筋混凝土結構於 30 克 C4 炸藥內部爆炸後-內部狀況

資料來源:作者自行拍攝

四、鋼筋混凝土結構-40 克

使用藥量為 40 克，爆炸後試體頂部外側有明顯裂痕，無疤落，4 面均有明顯裂痕，4 邊均開裂，4 邊與頂部交界處均有明顯裂痕，試體形狀無明顯變形，混凝土塊掉落狀況較 30 克明顯。與炸點接觸之內部有明顯炸坑，炸坑大小為長 11.3cm、寬 11.2cm、深 2.3cm，爆破後試體內部狀況如圖八。



圖八 鋼筋混凝土結構於 40 克 C4 炸藥內部爆炸後-內部狀況

資料來源:作者自行拍攝

五、鋼筋混凝土結構-50 克

使用藥量為 50 克之內部爆炸實驗共計 3 次，3 次實驗有不同結果。

第 1 次爆炸後試體頂部產生疤落，4 邊均開裂，4 側有明顯裂痕及開裂，4 邊與頂部交界處均有明顯裂痕。與炸點接觸之內部炸坑，炸坑大小為長 13.5cm、寬 11.5cm、深 3.0cm，爆破後試體內部狀況如圖九。

第 2 次實驗爆炸後發現 3 根鋼筋斷裂，位置皆為頂部與側邊交界部位，所有試驗中僅本次發生鋼筋斷裂現象。混凝土頂部僅有大且明顯裂縫，並無疤落產生，除未堆疊沙包側之鋼筋有向外擴展現象，其餘 4 面鋼筋變形不大，內部炸坑大小為長 12.5cm、寬 8.2cm、深 1.9cm，爆破後試體內部狀況如圖十。

第 3 次爆炸實驗爆炸威力將混凝土試體頂部炸開，試體頂部拱起，產生明顯自中心(炸點)延伸裂痕，未堆疊沙包側頂部約 1/4 混凝土塊遭炸飛，炸飛之混凝土塊成三角形，試體 4 側均有明顯裂痕，爆破後試體內部狀況如圖十一。



圖九 鋼筋混凝土結構於第 1 次 50 克 C4 炸藥內部爆炸後-內部狀況

資料來源:作者自行拍攝



圖十 鋼筋混凝土結構第 2 次 50 克 C4 炸藥內部爆炸後-內部狀況

資料來源:作者自行拍攝



圖十一 鋼筋混凝土結構第 3 次 50 克 C4 炸藥內部爆炸後-內部狀況

資料來源:作者自行拍攝

六、鋼筋混凝土結構-60 克

使用藥量為 60 克，爆炸後 4 面均有大量且明顯裂痕，4 邊均開裂，4 邊與頂部交界處均有明顯裂痕，有 2 側交接處鋼筋與混凝土脫離。內部炸坑大小為長 14.5cm、寬 10cm、深 2.5cm，破壞狀況如圖十二。



圖十二 鋼筋混凝土結構 60 克 C4 炸藥內部爆炸後-內部狀況

資料來源:作者自行拍攝

七、鋼筋混凝土結構-70 克

使用藥量為 70 克，爆炸威力使試體開口處呈近圓形，頂部與 4 側均產生開裂現象，試體大量混凝土飛散，內部炸坑大小為長 13.5cm、寬 12.5cm、深 2.5cm，爆炸後可清楚看見鋼筋，炸坑深度亦至鋼筋為止，如圖十三。



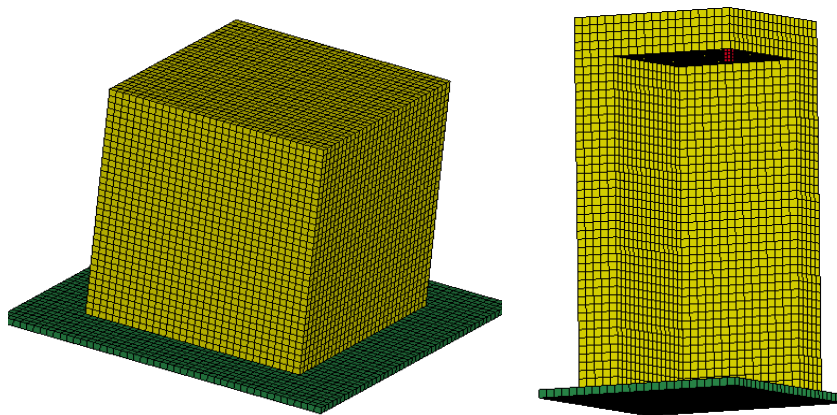
圖十三 鋼筋混凝土結構 70 克 C4 炸藥內部爆炸後-內部炸坑狀況

資料來源:作者自行拍攝

流固耦合數值模擬

一、數值模式建構

因實驗模型具對稱性，為使模型網格劃分更加細緻，並減少程式運算時間及降低資料存取量，故採用具有 2 個對稱面、1 個對稱軸的 1/4 對稱簡化模型進行模擬，其全/簡模型示意圖如十四所示。



圖十四 室內爆炸全/簡模型示意圖(左圖為全模型；右圖為 1/4 對稱簡化模型)

資料來源:作者自行繪製⁶

二、LS-DYNA 程式與 ALE 描述法

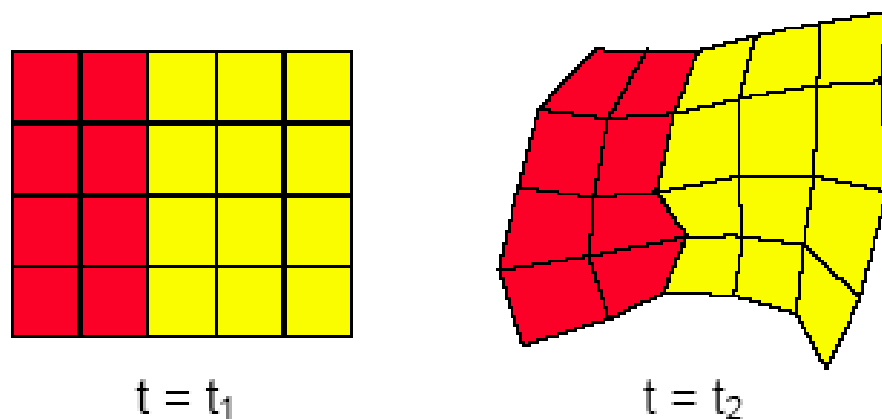
LS-DYNA 程式包括 DYNA2D 和 DYNA3D，由美國 Lawrence Livermore National Laboratory 的 H. O. Hallquist 主持研究開發，從 70 年代面世以後，經歷了許多版本，至今已較為成熟，目前正廣泛運用在各領域中。⁷

註⁶ 使用 LS-DYNA 3D 軟體繪製

註⁷ 白金澤“LS-DYNA 理論基礎與實例分析”，科學出版社，北京，2005。

ALE 描述法可以有效的跟蹤結構邊界的運動，克服網格單元嚴重變形所引致的數值計算困難，並完成流體與固體耦合的動態分析，如圖十五所示。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，即：

- (一)保持變形後的物體邊界條件，並對內部單元進行網格的重新劃分，稱為 Smooth-Step。
- (二)將變形網格中的單元變量(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，稱為 Advection Step。



圖十五 ALE 網格示意圖⁸

資料來源:同註⁸

三、數值模擬參數研究

本研究之數值模擬，以結構物頂版之炸坑現象為主要研究對象。以侵蝕條件(*MAT_ADD_EROSION)中的主應變(MXEPS)及剪應變(EPSSH)大小為研究目標。因 25 克 C4 炸藥爆炸實驗結果均為接觸面成坑，背面未疤落。25 克炸藥第 1 次與第 2 次之炸藥設置方向不同，第 1 次為與頂版平行，第 2 次為與頂版垂直，第 2 次與其他實驗設置方向相同，故取 25 克 C4 炸藥第 2 次爆炸實驗之爆炸結果為數值模擬比較對象。

(一)建構模型 01

建構純混凝土結構模型，模型炸藥為同體積轉換之正立方體，流體網格大小 0.62 cm，固體網格大小 1.25cm，說明如後。

以 25 克 C4 炸藥體積進行轉換，實驗量得炸藥圓柱直徑為 2.5cm、炸藥高為 3.1cm，體積為 15.2171cm^3 ，將圓柱體轉換為正立方體，其轉換正立方體體積邊長為 2.4781cm。因建構模型為 1/4 簡化模型，故炸藥邊長最大為 1.2391cm。混

^{註8} LS-DYNA KEYWORD User's Manual VOLUME I Version 971, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), May 2007.

凝土版厚為 10cm，將混凝土版厚 4 等分，則網格較簡略，混凝土版 8 等分得網格邊長 1.25cm，相對應流體網格邊長為 0.62cm，以本小節之模型大小計算，模型元素量 106 萬餘。若將混凝土網格 16 等分，固體網格邊長為 0.625cm，則流體相對應網格邊長為 0.31cm，元素量將增大為 8 百餘萬，如此大的元素量將造成電腦運算上困難，故取固體網格邊長 1.25cm，流體網格邊長 0.62cm。

(二)建構模型 02

建構純混凝土結構模型，模型炸藥為以同斷面積轉換之長方體，流體網格大小 0.542cm，固體網格大小 1.25cm。

以 25 克 C4 炸藥圓柱斷面積進行轉換，實驗量得炸藥圓柱直徑為 2.5cm、炸藥高為 3.1cm，斷面積為 4.9087cm^2 ，將面體轉換為正方形，其轉換正方形邊長為 2.2156cm。因建構模型為 1/4 簡化模型，故炸藥邊長最大為 1.1078cm。同上節，混凝土取固體網格邊長 1.25cm。考量實際炸藥高度、重量、體積、密度，流體網格邊長取 0.542cm，密度取 1.643g/cm^3 。炸藥長、寬取 4 格，高取 6 格網格時，重量誤差為 0.45%。

(三)建構模型 03

建構鋼筋混凝土結構，模型炸藥為以同斷面積轉換之長方體，流體網格大小 0.542cm，固體網格大小 1.25cm，映射後鋼筋斷面積不變，說明如後。

因本模型為 1/4 簡化模型，對稱面之鋼筋尺寸應為 1/2，如此於映射後鋼筋尺寸較合理，故以前小節模型為基礎，將對稱面固體元素寬度改為 1/2(0.625 cm)，實施模擬。與模型 2 相同，模擬時使用炸藥與混凝土接觸面積為 1.1751cm^2 ，較實驗 1.2272cm^2 小，模擬的炸藥高為 3.252cm，比實驗 3.1cm 大，

(四)建構模型 04

建構純混凝土結構，以鋼筋轉換斷面積大小為固體元素大小基準，流體網格大小 0.4225 cm，固體網格大小 0.845 cm，說明如後。

本研究中，實驗使用鋼筋為 3 號鋼筋，標稱直徑為 0.953cm，標稱斷面積為 0.713cm^2 ，以標稱面積大小轉換為正方形，其邊長為 0.845cm。取固體網格大小為 0.845cm，依 2.3.1.3 節所述，固體網格大小須至少為流體網格的 2 倍，流體網格大小取 0.4225cm，囿於流體尺寸，炸藥於模型建構時易失真，故模型建構時不建炸藥，炸藥所需大小、密度等參數於 K 檔中直接賦予，炸藥長、寬均為 0.55389cm，高為 3.1cm 之矩型，密度為 1.6428897g/cm^3 。

(五)建構模型 05

建構鋼筋混凝土結構，以鋼筋轉換斷面積大小為固體元素大小基準，流體網格大小 0.4225 cm，固體網格大小 0.845 cm，說明如後。

依前小節基礎及鋼筋位置，將鋼筋元素建構入模型內，並將對稱面固體元素寬度調整為 $1/2(0.4225\text{cm})$ ，使映射後鋼筋大小符合實際，惟觀察模擬結果，因對稱面元素寬度與流體一樣大，對稱面元素侵蝕結果明顯增大，故於取樣計算時捨去。

四、模擬結果比較

將上述模擬結果之統計，對不同炸藥形狀，有無鋼筋，對稱面鋼筋斷面積大小及元素網格大小進行比較，所得結果分述如下。

(一)模型 1 與模型 2 比較-不同炸藥形狀之比較

模型 1 與模型 2 均為純混凝土結構，固體網格大小同為 1.25cm ，而其相異處在於模型 1 的炸藥是以與實驗相同體積轉換之正方體，其流體網格大小為 0.62 ，炸藥與混凝土接觸面積為 1.5352cm^2 ，較實驗值 1.2272cm^2 大，模擬的炸藥高為 2.478cm ，比實驗值 3.1cm 小。而模型 2 炸藥則為以實驗炸藥等斷面積進行轉換之長方體，與混凝土接觸面積為 1.1751cm^2 ，較實驗值小，模擬的炸藥高為 3.252cm ，比實驗值大。比較表 4.3 與表 4.4，取模擬結果與實驗相近之侵蝕參數設定主應變為 0.004 與剪應變為 0.005 時實施比較，結果如表一，顯示炸藥形狀對於炸坑長度、寬度及深度影響很大，因此建模時炸藥形狀必須考量。

模擬結果比較表-模型 1 與模型 2 侵蝕狀況						
模型及變數	模擬長	誤差百分比	模擬寬	誤差百分比	模擬深	誤差百分比
模型 1 主應變 0.004	10	-7.41%	7.5	-9.64%	2.5	35.87%
模型 1 剪應變 0.005	10	-7.41%	10	20.48%	2.5	35.87%
模型 2 主應變 0.004	10	-7.41%	5	-39.76%	5	171.74%
模型 2 剪應變 0.005	12.5	15.74%	5	-39.76%	5	171.74%
說明	相同：純混凝土結構、固體網格大小 相異：炸藥尺寸(流體網格大小) 實驗長：10.8 實驗寬：8.3 實驗深：1.84					

表一 模型 1 與模型 2 模擬結果比較表

資料來源:作者自行製作

(二)模型 2 與模型 3 比較-純混凝土與鋼筋混凝土比較

模型 2 與模型 3 其流體網格均為 0.542cm，固體網格模型 2 為 1.25cm，模型 3 除對稱面網格寬度改為 0.625 外，其餘固體網格亦均為 1.25cm，炸藥的所有參數都相同。但模型 2 的結構物為純混凝土結構，而模型 3 為鋼筋混凝土結構，將模型 2 與模型 3 相比較，顯示鋼筋的加入可有效抑止炸坑深度，及炸點背後的疤落現象。模型 3 中侵蝕參數設定為剪應變 0.003 及 0.004 與 0.005 量測值相同，均與實驗結果接近，但侵蝕形狀並不相同，取模型 3 中剪應變為 0.003 時與模型 2 比較，結果如表二，模型 3 表現較模型 2 佳。

模擬結果比較表-模型 2 與模型 3 侵蝕狀況						
模型及變數	模擬長	誤差百分比	模擬寬	誤差百分比	模擬深	誤差百分比
模型 2 剪應變 0.003	17.5	62.04%	5	-39.76%	6.25	239.67%
模型 3 剪應變 0.003	11.25	4.17%	11.25	35.54%	3.75	103.80%
說明	相同：流體網格大小、固體網格大小、炸藥尺寸 相異：是否使用鋼筋 實驗長：10.8 實驗寬：8.3 實驗深：1.84					

表二 模型 2 與模型 3 模擬結果比較表

資料來源:作者自行製作

(三)模型 4 與模型 1 及模型 2、模型 5 與模型 3 比較-不同網格尺寸

模型 4 的固體網格大小為 0.845cm，而流體網格為 0.4225cm，與模型 1 與模型 2 不同，網格較緻密，取侵蝕參數主應變與剪應變各為 0.003 時，與模型 1 與模型 2 作比較，結果如表三。模型 5 流體網格大小與模型 4 相同，而固體網格除對稱面外，其餘也與模型 4 相同，與模型 3 不同，取侵蝕參數為 0.003 時比較模型 5 與模型 3。結果如表四。

其中顯示網格縮小之後，除模型 3 的主應變誤差百分比較模型 5 接近實驗值 1.94% 外，其餘模型 4 與模型 5 的誤差百分比均較模型 1 模型 2 及模型 3 小，也就是網格越緻密，其誤差越小。

模擬結果比較表-模型 4 與模型 1 及模型 2						
模型及變數	模擬長	誤差百分比	模擬寬	誤差百分比	模擬深	誤差百分比
模型 1 主應變 0.003	12.5	15.74%	12.5	50.60%	3.75	103.80%
模型 1 剪應變 0.003	12.5	15.74%	12.5	50.60%	3.75	103.80%
模型 2 主應變 0.003	12.5	15.74%	5	-39.76%	6.25	239.67%
模型 2 剪應變 0.003	17.5	62.04%	5	-39.76%	6.25	239.67%
模型 5 主應變 0.003	10.14	-6.11%	10.14	22.17%	3.38	83.70%
模型 5 剪應變 0.003	10.14	-6.11%	10.14	22.17%	3.38	83.70%
說明	相同：是否使用鋼筋 相異：流體網格大小、固體網格大小 實驗長：10.8 實驗寬：8.3 實驗深：1.84					

表三 模型 4 與模型 1 與模型 2 模擬結果比較表

資料來源:作者自行製作

模擬結果比較表-模型 5 與模型 3						
變數	模擬長	誤差百分比	模擬寬	誤差百分比	模擬深	誤差百分比
模型 5 剪應變 0.003	10.14	-6.11%	10.14	22.17%	2.535	37.77%
模型 3 剪應變 0.003	11.25	4.17%	11.25	35.54%	3.75	103.80%
說明	相同：是否使用鋼筋 相異：流體網格大小、固體網格大小 實驗長：10.8 實驗寬：8.3 實驗深：1.84					

表四 模型 5 與模型 3 模擬結果比較表

資料來源:作者自行製作

(四)模型 4 與模型 5 比較-鋼筋等斷面積下純混凝土與鋼筋混凝土比較

模型 4 與模型 5 的固體網格大小都是以 3 號鋼筋斷面積為基準，進行面積轉換，網格邊長為 0.845cm，而流體網格則僅取固體網格大小的一半，即 0.4225cm。模型 4 與模型 5 的差異主要在於模型 4 為純混凝土結構，而模型 5 為鋼筋混凝土結構，另外在對稱面的網格寬度，模型 5 為使鋼筋斷面積於映射後保持一致，故將寬度減為 0.4225cm。侵蝕參數剪應變為 0.003 時模擬結果模型 4 與模型 5 均最接近實驗結果，故取其比較模型 4 與模型 5，結果如表五。模擬長度均為 10.14cm，模擬寬度均為 10.14cm，而模型 4 深度為 3.38cm，模型 5 深度為 2.535cm，與兩者誤差百分比達 45.93%，顯示建模時不能忽略鋼筋，否則影響炸坑深度極大。

模擬結果比較表-模型 4 與模型 5 侵蝕狀況						
模型及變數	模擬長	誤差百分比	模擬寬	誤差百分比	模擬深	誤差百分比
模型 4 剪應變 0.003	10.14	-6.11%	10.14	22.17%	3.38	83.70%
模型 5 剪應變 0.003	10.14	-6.11%	10.14	22.17%	2.535	37.77%
說明	相同：流體網格大小、固體網格大小、炸藥尺寸 相異：是否使用鋼筋 實驗長：10.8 實驗寬：8.3 實驗深：1.84					

表五 模型 4 與模型 5 模擬結果比較表

資料來源:作者自行製作

結論與建議

一、結論

目前台灣地區建物大多為鋼筋混凝土結構，因此，本研究透過小藥量爆炸實驗及運用 LS-DYNA 軟體數值模擬，針對鋼筋混凝土結構於室內爆炸狀況下之結構物行為進行研究。其中實驗部分透過不同藥量對結構物進行內部爆炸實驗，而模擬部分則取實驗結果中，結構物未有背面疤落的狀況及明顯裂痕的 25 克炸藥狀況下，對侵蝕參數中的主應變及剪應變進行模擬，所得結論分述如下⁹

(一)爆炸造成之炸坑大小及深度與炸藥重量、炸藥本身密度、炸藥形狀及接觸面積相關。

註⁹ 曲先莊，“鋼筋混凝土版承受室內爆炸試驗及模擬之驗證”，碩士論文，國防大學，桃園，2009。

(二)運用 ALE 流固耦合算法，可模擬鋼筋混凝土結構於小藥量室內爆炸狀況下之坑洞，但混凝土坑洞直徑誤差最大為 22%，深度達 38%。

(三)炸藥形狀將影響模擬結果，形狀越狹長，形成炸坑深度越深。

(四)建模時須考慮鋼筋，加入鋼筋元素後，可有效減少炸坑深度，使模擬結果更接近實驗結果。

(五)使用 ALE 流固耦合方式進行模擬時，固體網格大小需為流體網格大小 2 倍以上，否則將造成異常使運算結果不準確。

二、建議

(一)本次實驗僅使用 1 架高速攝影機，對於影像拍攝僅能取一個方向及角度，於試拍時發現室外爆炸時強光及火球影響，造成結構物行為無法識別，且爆炸產生的煙塵遮蔽視線，對觀測產生很大影響。建議採用 2 架以上新式高速攝影機，使觀測倍率提升，且經不同角度拍攝，消彌視界死角。若可能，未來研究可採用紅外線高速攝影機，以減低火光及煙塵造成遮蔽影響。

(二)實驗時需使用模型以固定炸藥形狀，並儘量使炸藥本身密度趨於一致，以減少實驗變數。

(三)為配合工校實爆環境及數值模擬，實驗試體的尺寸需加以考量，本次實驗試體體積近 1 立方公尺，造成模擬時元素量動輒百萬，若要細分網格，則元素量過多造成現有個人電腦運算困難。

(四)本次實驗主為探討密閉空間內爆炸與結構物相互影響，並將實驗結果與模擬相互驗證，後續研究可對一定開放空間中，爆炸對周遭環境與結構影響進行探討，以有效計算城鎮戰中，工兵運用爆破手段於建物中開設通道與設置阻絕時，所需安全距離。

作者簡介

作者曲先莊。中正理工學院84年班軍工系、工兵正規班、國防大學理工學院研究所碩士。歷任排長、中隊長及教育參謀官、教育訓練官、群訓練官、工兵組參謀官等職務，現任職於工兵學校軍工組主任教官。

參考文獻

1. Departments of the Army, the Navy, and the Air Force, “Structures To Resist The Effects Of Accidental Explosions,” Technical Manual TM5-1300, USA 1990.
2. 鄭冠豪，“爆破教範”，國軍準則，陸軍工兵學校，高雄，2006。
3. 白金澤“LS-DYNA 理論基礎與實例分析”，科學版社，北京，2005。
4. LS-DYNA KEYWORD User's Manual VOLUME I Version 971, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), May 2007.
5. 趙海鷗，“LS-DYNA 動力分析指南”，兵器工業出版社，北京，第 3-7 頁，2003。
6. 曲先莊，“鋼筋混凝土版承受室內爆炸試驗及模擬之驗證”，碩士論文，國防大學，桃園，2009。