

建築物受爆壓之動態模擬

李政錡, 李啟建

國家中山科學研究院 航空研究所 結構與材料系統組

摘要

本文主要藉由 Abaqus 有限元素軟體，模擬建築物受炸藥爆炸作用之現象。採用空爆 (Air Blast) 模型係以 Lagrangian 元素網格描述建築物，另以空爆程式功能指定炸藥量及炸點位置，Abaqus 內建程式會以美軍 TM-5-855-1 技術手冊相關經驗公式，計算加載在建築物不同位置之爆壓。爆炸模擬結果將解出應力值及加速度值，以利於計算建築物特定位置爆炸時的加速度歷時曲線，作為減震設計與分析之應用。本文所建立的分析流程可提供工程人員作為分析與設計之參考。

關鍵字：建築物、爆炸、Abaqus、Air Blast、Lagrangian

ABSTRACT

The objective of this paper is to simulate the behavior of building explosion by using Abaqus software. The building was modeled by Lagrangian mesh, and the explosive was modeled by specifying the quantity and location in Air Blast program. The built-in program of Abaqus would calculate blast pressure for different locations of the building according to empirical formulas from American Technical Manual TM-5-855-1. Results would show the stress and acceleration evolution of the building during explosion and could be applied to the shock-reduced design and analysis.

Keywords: Building, Explosion, Abaqus, Air Blast, Lagrangian

一、緒論

近年來爆炸案例層出不窮，例如 1995 年發生美國奧克拉荷馬州的聯邦大樓遭受汽車炸彈攻擊事件，2005 年在黎巴嫩發生的炸彈攻擊事件，以及在 2014 年國內發生的高雄氣爆事件，使得有關「爆炸」的議題，成為各國媒體關切的焦點。

因此，如果能夠建立爆炸動態分析流程，預估爆炸所產生的爆壓及衝量值，則可以預先建立相對應的保護機制，將傷害降到最低，減少意外傷亡。另外，除了人員傷亡之外，設備的損壞也是另一項關注的議題，若能預估設備因爆炸所引起的加速度值，就可以預先得知減震設計的依據，降低爆炸損傷。

本文參考美軍 TM5-855-1 技術手冊 [1][2] 作為攻堅彈頭地下爆炸威力分析之理論基礎，並應用 Abaqus 有限元素暫態

分析軟體，進行地下爆炸對建築物之動態反應數值分析，計算建築物內部特定位置之加速度歷時曲線 (G-T 曲線)，提供後續設備減震設計與分析之應用。

TM5-855-1 為美軍武器彈藥防護設計分析技術手冊，也是國內相關單位防護設計之重要參考依據之一。本文參考該手冊之空中爆炸以及地下爆炸相關理論及經驗公式，探討威脅武器攻擊建築物之爆震效應，包括爆壓、衝量等威力參數之計算，作為後續應用 Abaqus[3] 軟體進行地下爆炸對建築物動態反應分析之輸入數據。

二、分析條件

2.1 威脅武器

本節列出 2 種威脅武器，分別為 A、B 兩種不同威力之炸藥，其性能諸元如表

1 所示。

本文分別以 A 炸藥於建築物頂板爆炸上方 1 公尺處引爆, B 炸藥於建築物側板 1 公尺處引爆, 以進行建築物受爆壓影響之動態分析。

2.2 建築物

建築物之幾何模型如圖 1。其中, 模型長度為 9 公尺, 寬度 10 公尺, 高度 6.95 公尺。建築物之其中兩道牆面分別設有 2 個大窗口(1.2 公尺x3 公尺)以及 4 個小窗口(1.2 公尺x2 公尺), 窗口與牆面之邊距為 1 公尺, 窗口與窗口之間距為 0.5 公尺, 其窗口尺寸可參考圖 2。另外兩道牆面亦分別設有 2 個大窗口(1.2 公尺x2.4 公尺)以及 4 個小窗口(1.2 公尺x1.8 公尺), 其窗口尺寸可參考圖 3。

2.3 設備安裝位置

建築物一樓內部設備安裝圖 4 所示, 二樓內部設備安裝圖如圖 5 所示。若考慮座標原點於圖 2 左牆之牆面中心, 則一樓設備安裝位置座標如表 2 所示, 二樓設備安裝位置座標如表 3 所示。

三、地下爆炸威力分析

參考美軍 TM5-855-1 技術手冊[1], 地下爆炸分析經驗公式說明如下。

炸藥地下爆炸之入射爆壓峰值計算式為:

$$P_0 = f[\rho c] \square 60 \left[\frac{R}{W^{1/3}} \right]^{-n} \quad (3.1)$$

其中,

P_0 : 入射爆壓峰值(psi)

f : 土壤與震波互制係數(coupling factor)

(ρc) : 土壤阻抗係數(acoustic impedance)

R : 炸點距離(ft)

W : 炸藥 TNT 當量(lb)

n : 土壤震波衰減係數

當入射爆壓達峰值 P_0 後, 其值會以指數函數遞減, 將爆壓對時間積分可得其所對應之衝量 I_0 經驗公式:

$$I_0 = W^{1/3} \square f \square .1 \square \rho_0 \left[\frac{R}{W^{1/3}} \right]^{-n} \quad (3.2)$$

其中,

I_0 : 入射爆炸衝量(psi\lsec)

ρ_0 : 土壤質量密度(lbf\lsec²/ft⁴)

本文所使用的土壤參數如表 4 所示。

為了工程計算方便, 通常將爆壓力時曲線等效為三角形壓力歷時關係, 其時間計算方式如下:

$$t = \frac{2I_0}{P_0} \quad (3.3)$$

透過公式(3.1)-(3.3)得以計算距離炸點位置 R 的爆壓峰值 P_0 與爆壓作用時間 t , 作為後續 Abaqus 進行爆炸動態模擬分析應用之輸入參數。

另外, 為了進行結構設計分析, 計算 A、B 兩種威脅武器對建築物頂板及側牆的爆壓與衝量如表 5, 壓力歷時曲線轉換為等衝量三角形壓力歷時如表 6。表中之反射爆壓是以入射爆壓 P_0 之 1.5 倍計算, 反射爆壓之等三角形作用時間 t_r 計算如下:

$$t_r = \frac{1}{3} (0.0048 + 2t) \quad (\text{sec}) \quad (3.4)$$

四、Abaqus 分析模型

4.1 分析方法及流程

本文以 Abaqus 進行地下建築承受爆炸現象分析, 其模擬方法如下:

採用空中爆炸模型進行爆炸模擬, 只以 Lagrangian 元素網格描述建築物, 另以 *Air_Blast 之程式內建功能指定炸藥量及炸點位置, 程式會以美軍 TM5-855-1 技術手冊相關經驗公式, 計算加載在建築物不同位置之爆壓歷時曲線。相較於流固耦合模型, 此模擬方法可大幅節省運算量與時間, 並得到合理之爆炸模擬結果。

本文所建立之爆炸分析流程如圖 6 所示。

1. 幾何模型: 建立建築物之幾何模型。
2. 有限元素模型: 將幾何模型進行網格劃分。

3. 炸藥量與炸點設定：利用 Abaqus 內建空爆程式，直接給定炸藥量與炸點之空間座標。
4. 顯示動力求解：利用 Abaqus 中暫態分析功能，執行爆炸動態求解。
5. 輸出應力與加速度值：利用 Abaqus 之後處理功能，輸出全模型應力值以及模型內部特定点之加速度值。

4.2 有限元素網格

本文 Abaqus 分析模型所使用之有限元素網格如圖 7 所示。總計 60820 個節點，41856 個元素，元素型態為 C3D8 實體元素。

4.3 爆炸載重設定

由於目前 Abaqus 程式中內建美軍 TM5-855-1 技術手冊的相關經驗公式僅考慮地表空中爆炸效應，因此，為了要應用 Abaqus 程式在本文的地下爆炸模擬，必須以「衝量等效」的概念進行 *Air_Blast 的參數設定。換句話說，就是在炸點位置維持不變的狀況下，調整炸藥量，進行 *Air_Blast 的參數修正，直到該炸藥量作用在建築物之爆炸衝量與表 4 之反射衝量相近，即以該炸藥量作為 *Air_Blast 的參數設定，進行 Abaqus 分析。

本文共進行兩處地下爆炸模擬，其炸點及 *Air_Blast 的等效炸藥量設定分別說明如下：

1. 威脅武器 A 於側牆外側引爆：

炸點位置為建築物側牆中心外側 1 公尺處，如圖 8 所示。威脅武器 A 的炸藥量為 475 kg(表 1)，其反射衝量 I_r 為 438.34 MPa \cdot msec(表 5)。經以 Abaqus 試算，*Air_Blast 的等效炸藥量設定為 1038 kg 時，作用在側牆中心之衝量可達 437.56 MPa \cdot msec(圖 9)，側牆中心之所承受之爆壓峰值為 582.306MPa，爆壓延時約為 1.7msec，其爆壓歷時曲線如圖 10 所示。

2. 威脅武器 B 於頂板上方引爆：

炸點位置為建築物頂板中心上方 1 公尺處，如圖 12 所示。威脅武器 B 的炸藥量為 150 kg(表 1)，其反射衝量 I_r 為 33.859 MPa \cdot msec(表 5)。經以 Abaqus 試

算，*Air_Blast 的等效炸藥量設定為 141 kg 時，作用在側牆中心之衝量可達 33.885MPa \cdot msec(圖 13)，側牆中心之所承受之爆壓峰值為 142.918MPa，爆壓延時約為 1.4msec，其爆壓歷時曲線如圖 14 所示。

五、Abaqus 分析結果

案例一(威脅武器 A 於側牆外爆炸)及案例二(威脅武器 B 於頂板上方爆炸)分析結果，各設備位置的瞬間最大加速度值如表 7 所示。

案例一，威脅武器 A 於側牆外爆炸，最大瞬間加速度值 426028(m/s²)(~43428G)，發生在 2F 設備位置編號 5。

案例二，威脅武器 B 於側牆外爆炸，最大瞬間加速度值 28764.7(m/s²)(~2932G)，發生在 2F 設備位置編號 9。其他細部分析資料可參考 5.1 與 5.2 節說明。

5.1 建築物側牆外爆炸分析

Abaqus 分析模型及爆震波作用示意如圖 14 所示。

設備安裝位置之 X-、Y-、Z-加速度歷時曲線分別如圖 15、圖 16、圖 17 所示。

當側牆受到爆震波作用時，設備安裝位置以 Z 方向(樓板垂直方向)所承受之加速度最大。

5.2 建築物頂板上方爆炸分析

Abaqus 分析模型及爆震波作用示意如圖 18 所示。

設備安裝位置之 X-、Y-、Z-加速度歷時曲線分別如圖 19、圖 20、圖 21 所示。

當頂板受到爆震波作用時，設備安裝位置以 Z 方向(樓板垂直方向)所承受之加速度最大。

六、結語

本文建立爆炸分析流程，利用 Abaqus 進行爆炸動態模擬。利用 Abaqus 內建程式 *Air_Blast 配合等爆炸衝量概念，進行案例一(威脅武器 A 於側牆外爆炸)及案例二(威脅武器 B 於頂板上方爆炸)

分析，此方法可以大幅減少運算量，縮短模擬時間，並得到合理的爆炸分析結果。

計算結果簡述如下：

案例一(威脅武器 A 於側牆外爆炸)，Abaqus 等效炸藥量 1038 kg 時，作用於側牆中心之衝量可達 437.56 MPa \cdot msec，側牆中心之所承受之爆壓峰值為 582.306MPa，爆壓延時約為 1.7msec，最靠近炸點之設備位置編號 5 承受最大之瞬間加速度值(~43428G)，設備安裝位置之 X-、Y-、Z-加速度歷時曲線分別為圖 15~17。

案例二(威脅武器 B 於頂板上方爆炸)，Abaqus 等效炸藥量 141 kg 時，作用於側牆中心之衝量可達 33.885 MPa \cdot msec，側牆中心之所承受之爆壓峰值為 142.918MPa，爆壓延時約為 1.4msec，最靠近炸點之設備位置編號 9 承受最大之瞬間加速度值(~2932G)，設備安裝位置之 X-、Y-、Z-加速度歷時曲線分別為圖 19~21。

本文完成 9 個設備安裝位置之加速度歷時曲線分析結果，可提供後續設備減震設計之應用。

九、參考文獻

- [1] Department of the Army, "Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons," Technical Manual TM5-855-1, 1986.
- [2] Department of the Army, "Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons Effects," Technical Manual TM5-855-1, 1998.
- [3] Abaqus, "Analysis User's Manual", Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2012.

十、表格

威脅武器	彈頭重量 (kg)	彈頭長度 (mm)	炸藥重量 (kg)	撞擊速度 (m/sec)
A	940	2596	475	245
B	500	2000	150	1980

表 1 威脅武器性能諸元表

位置編號	X 座標 (cm)	Y 座標 (cm)	Z 座標 (cm)
1	100	0	-330
2	900	0	-330
3	500	350	-330
4	500	-350	-330

表 2 建築物 1F 設備安裝位置座標

位置編號	X 座標 (cm)	Y 座標 (cm)	Z 座標 (cm)
5	100	0	0
6	900	0	0
7	485	350	0
8	485	-350	0
9	485	0	0

表 3 建築物 2F 設備安裝位置座標

波速 (fps),c	阻抗係數 (psi/fps), pc	衰減係數 n
600	12	3.25

表 4 土壤參數[1]

威脅武器	頂板引爆		側牆引爆	
	反射爆壓 psi (MPa)	反射衝量 psi \cdot sec (MPa \cdot msec)	反射爆壓 psi (MPa)	反射衝量 psi \cdot sec (MPa \cdot msec)
A	304.5 (2.10)	4.837 (33.86)	1827 (12.60)	16.70 (116.90)
B	177 (1.22)	3.864 (27.05)	7689 (53.03)	62.62 (438.34)

表 5 武器攻擊之爆壓及衝量計算結果

威脅武器	頂板引爆		側牆引爆	
	反射爆壓 psi (MPa)	等三角形延時 sec	反射爆壓 psi (MPa)	等三角形延時 sec
A	304.50 (2.10)	0.03	1827 (12.60)	0.02
B	177 (1.22)	0.05	7689 (53.03)	0.02

表 6 武器攻擊之等三角形延時計算結果

位置編號	Abaqus 節點編號	瞬間最大加速度(m/sec ²)	
		頂板上方引爆	側牆外引爆
1	11059	3416.08	169993.00
2	42230	3416.08	6449.38
3	5505	4003.56	7626.43
4	25697	4003.56	7626.43
5	6668	17316.30	426028.00
6	37839	17316.30	44126.90
7	5600	15380.40	27364.80
8	25602	15380.40	27364.60
9	6202	28764.70	103438.00

表 7 頂板與側牆受爆震波作用各設備位置承受瞬間最大加速度值

十一、圖片

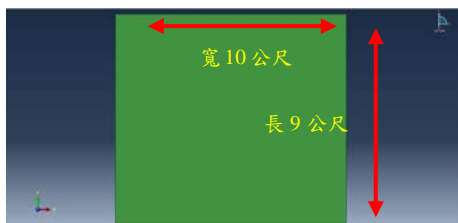


圖 1 建築物上視圖

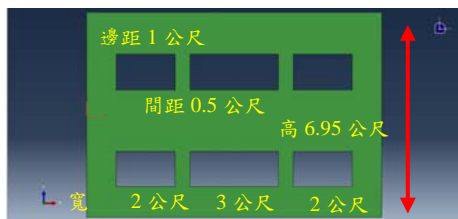


圖 2 建築物側視圖一(x-z 平面)



圖 3 建築物側視圖二(y-z 平面)

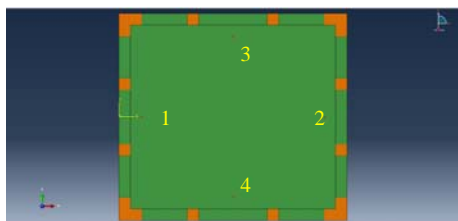


圖 4 建築物 1F 設備安裝位置圖

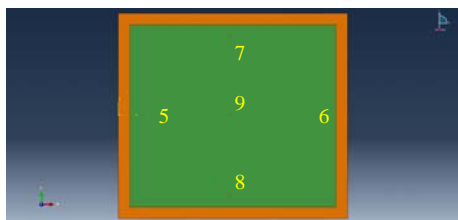


圖 5 建築物 2F 設備安裝位置圖



圖 6 爆炸分析流程

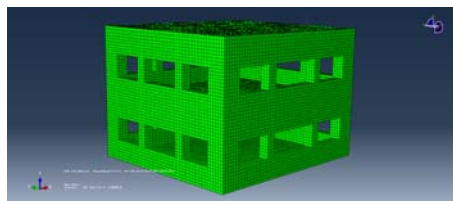


圖 7 建築物之有限元素模型

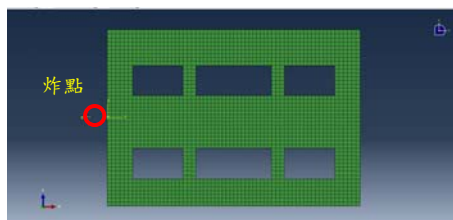


圖 8 炸點位於建築物側牆外 1 公尺示意圖

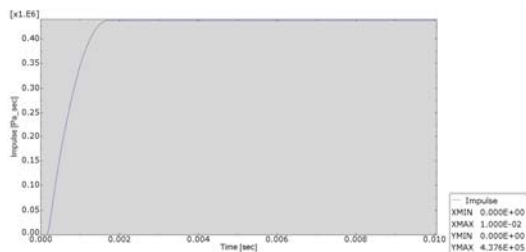


圖 9 建築物側牆中心之衝量

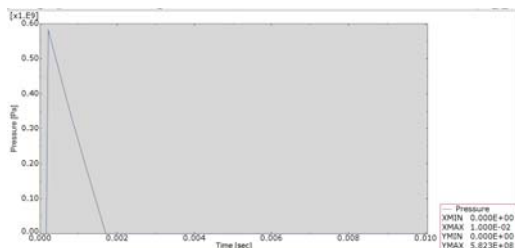


圖 10 建築物側牆中心爆壓歷程

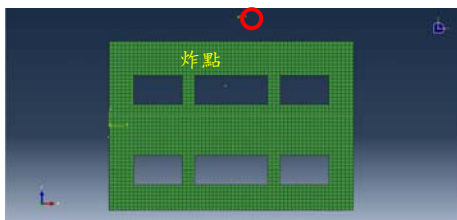


圖 11 炸點位於建築物頂板上1公尺示意圖

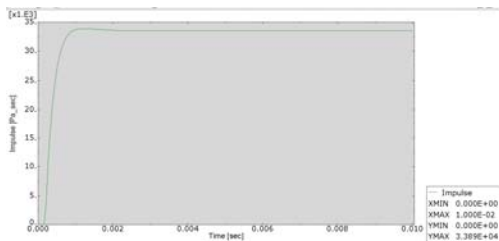


圖 12 建築物頂板中心之衝量

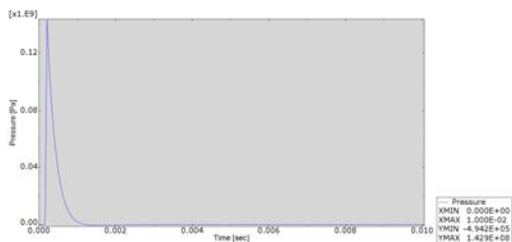


圖 13 建築物頂板中心爆壓歷程

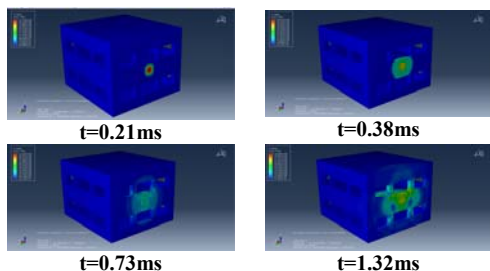


圖 14 建築物側牆受爆震波作用歷時

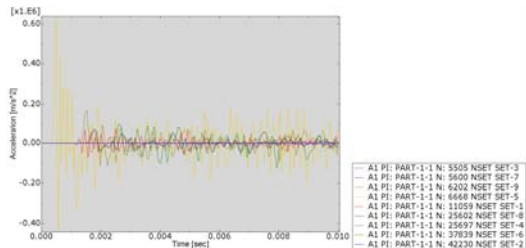


圖 15 側牆受爆震波作用各設備安裝位置之X方向加速度歷時曲線

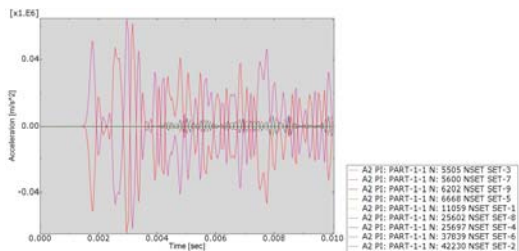


圖 16 側牆受爆震波作用各設備安裝位置之Y方向加速度歷時曲線

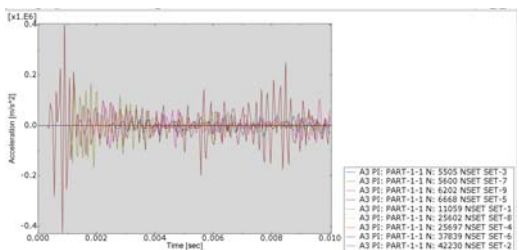


圖 17 側牆受爆震波作用各設備安裝位置之Z方向加速度歷時曲線

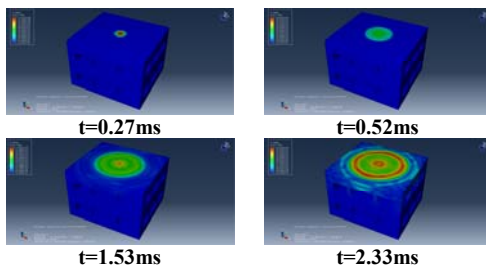


圖 18 建築物頂板受爆震波作用歷時

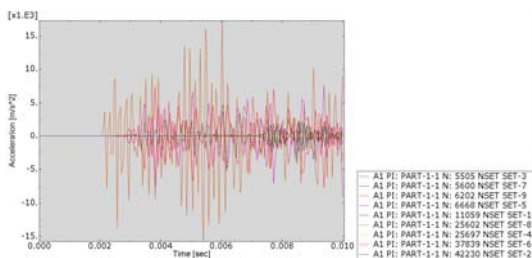


圖 19 頂板受爆震波作用各設備安裝位置之X方向加速度歷時曲線

2014 SIMULIA Regional User Meeting

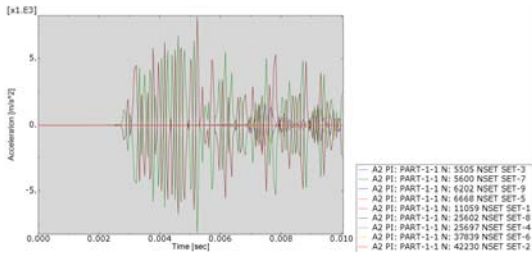


圖 20 頂板受爆震波作用各設備安裝位置之 Y 方向加速度歷時曲線

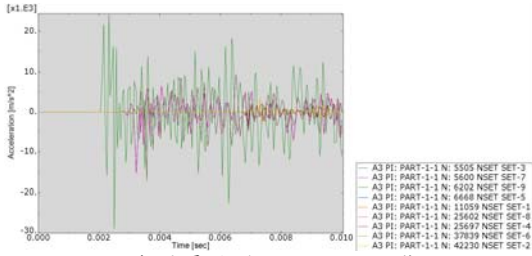


圖 21 頂板受爆震波作用各設備安裝位置之 Z 方向加速度歷時曲線